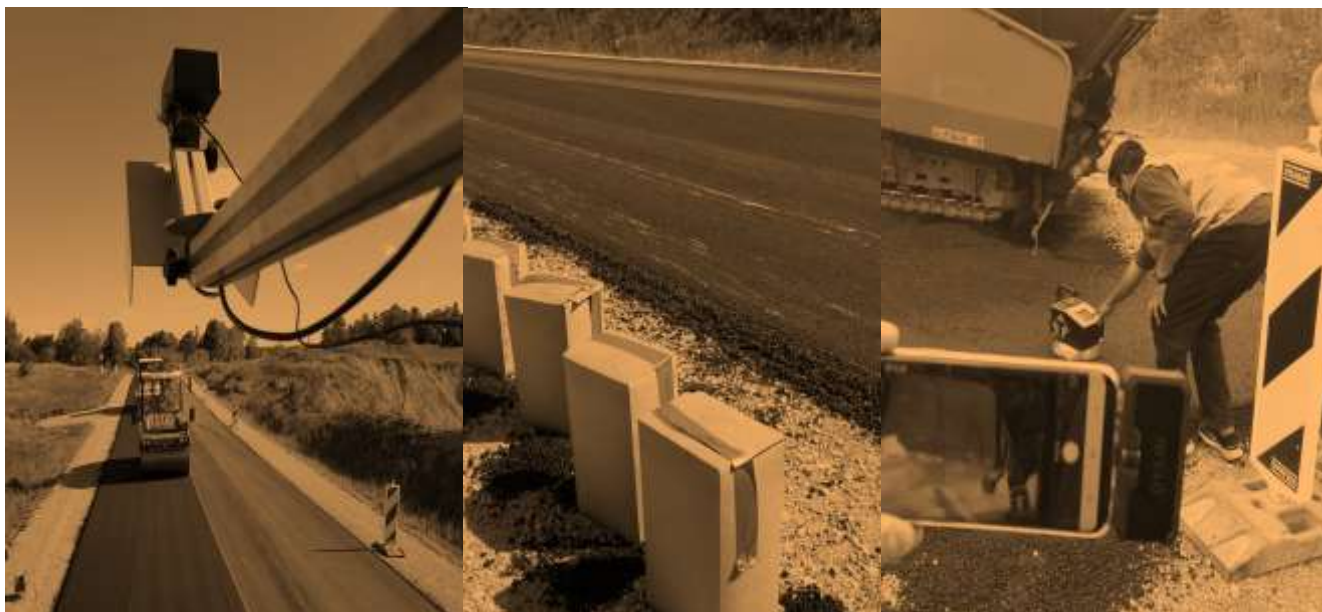


# Siltā asfalta pielietošana Latvijas apstākļos (WARMIX)



---

## Pētījums

## Siltā asfalta pielietošana Latvijas apstākļos

---

## Izpildītājs

## SIA "Ceļu eksperts"



Juridiskā adrese

Aveņu iela 1, Ikšķīle, Ikšķīles novads,  
LV5052

Reģistrācijas numurs

40003876635

Tālrunis

+371 67255696

E-pasts

celueksperts@celueksperts.lv

Darba vadītājs

Dr. Sc. ing. Mārtiņš Zaumanis

---

## Pasūtītājs

## VAS "Latvijas Valsts ceļi"



Reģistrācijas numurs

40003344207

Juridiskā adrese

Gogoļa iela 3, Rīga, LV-1051

Līguma Nr.

LVC2019/1.10/1/AC

Stadija

Gala ziņojums



Partneri

SIA “ExAs Engineering”

E-pasts

jeckabs@gmail.com

Pētniecības projekta nosaukums		
<b>Siltā asfalta pielietošana Latvijas apstākļos</b>		
Līguma numurs	LVC2019/1.10/1/AC	
Līguma slēgšanas datums	17.01.2019	
Pētniecības projekta stadija	4. starpziņojums (gala ziņojums)	
Starpziņojumu kopējais skaits	4	
Ziņojuma nodošanas datums	11.12.2020	
Pētniecības projekta stadijas izstrādes periods	11.06.2020 līdz 11.12.2020	
Lappušu skaits	78	
Eksemplāru skaits	1	
Pētniecības programma		
JAUNU TEHNOLOĢIJU IZPĒTES PROGRAMMA 2019. - 2021. GADAM		
Atbildīgā institūcija/uzņēmums: SIA "Ceļu eksperts", Avenņu iela 1, Ikšķīle, Ikšķīles novads, LV-5052, Reģistrācijas Nr.: 40003876635		
Pētniecības projekta izpildītāji	Zinātniskais grāds, Vārds, Uzvārds	Paraksts
Pētniecības projekta vadītājs	Dr. Sc. ing. Mārtiņš Zaumanis	
Projektu finansē	VAS „Latvijas Valsts ceļi” / Satiksmes ministrija	
Partneri	SIA "ExAs Engineering", Tapešu iela 53 - 14, Rīga, LV-1083, Reģistrācijas Nr.: 40103870183	
Īss apraksts		
<p>Siltā asfalta tehnoloģijas ļauj samazināt asfalta ražošanas un ieklāšanas temperatūru, kā arī uzlabot maisījumu iestrādājamību. Šajā pētījumā apskatītas siltā asfalta pielietošanas īpatnības, veikta datorsimulācija pie dažādām apkārtējās vides temperatūrām, kā arī veikta maisījumu ieklāšana būvobjektā un ekspluatācijas īpašību testēšana laboratorijā. Balstoties uz pētījuma rezultātiem, izstrādātas rekomendācijas apstākļiem, pie kādiem ieteicams lietot siltā asfalta un viegliestrādājamību uzlabojošas piedevas. Tāpat pētījuma rezultātā izstrādāti ieteikumi viegliestrādājamības piedevu un siltā asfalta definīcijām, piedāvātas izmaiņas Ceļu specifikācijās, lai pieļautu šādu maisījumu lietošanu, kā arī izstrādātas prasības maisījumu projektēšanai un kvalitātes kontrolei.</p>		
Pielietojums/pētījuma sfēra	Autoceļu būvniecība	
Papildus izstrādātie materiāli	Pielikumā <i>MultiCool</i> programma un atskaite par termogrāfijas mērījumiem	

# Kopsavilkums

Siltā asfalta (WMA) tehnoloģijas ļauj samazināt asfalta ražošanas un ieklāšanas temperatūru, kā arī uzlabot asfalta iestrādājamību nelabvēlīgos laikapstākļos. Šo priekšrocību dēļ ir sagaidāms, ka nākotnē WMA kļūs par svarīgu asfalta ražošanas tehnoloģiju. WMA lietošanai nav nekādu ierobežojumu attiecībā uz maisījuma tipiem vai izmantotajiem materiāliem, tomēr ražotājam ir jābūt informētam par ražošanas tehnoloģijām, lai nodrošinātu līdzvērtīgas īpašības kā karstajam asfaltam.

Šī pētījuma literatūras apskata sadaļā izklāstītas atšķirības starp dažādām siltā asfalta tehnoloģijām, aprakstītas sagaidāmās maisījuma īpašības un to īpatnības salīdzinājumā ar karsto asfaltu, kā arī doti padomi siltā asfalta maisījumu projektēšanai.

Eksperimentālajā daļā veikta izmēģinājuma posma izbūve, kurā blakus ieklāta siltā un karstā asfalta segas virskārta. Ieklāšanas laikā veikti mērījumi ar termogrāfijas kamerām un operatīvo sablīvējuma mērījuma metodi. Noņemti arī masas paraugi, kam testētas ekspluatācijas īpašības. Ieklātajam asfaltam noteikts sablīvējums gan izmantojot grunts penetrācijas radaru, gan urbumus. Veikta arī paraugu maisīšana laboratorijā, kur izmēģinātas dažādas siltā asfalta temperatūras un izstrādātas prasības siltā asfalta kvalitātes kontrolei.

Pētījuma rezultāti norāda, ka WMA ķīmisko piedevu pievienošana ļauj samazināt ražošanas temperatūru vismaz par 20°C, kopumā nepasliktinot maisījuma sablīvējamību un ekspluatācijas īpašības. Tomēr ražotājam jāņem vērā tehnoloģiskā procesa īpatnības un kvalitātes kontroles laikā sablīvēšana jāveic pie temperatūras, ko izmanto karstajam asfaltam.

Izmantojot datorsimulāciju, izmēģināti dažādi scenāriji asfalta ieklāšanai nelabvēlīgos apkārtējās vides apstākļos. Noteikts, ka siltā asfalta piedevu lietošana var ievērojami palielināt veltīto laiku, kas īpaši svarīgi segas virskārtām. Tādējādi var tikt uzlabots asfalta sablīvējums un sablīvējuma viendabība arī termālās segregācijas apstākļos. Tas savukārt var uzlabot asfalta ilgmūžību.

Noteikts, ka ražošanas temperatūras pazemināšana ļauj samazināt asfalta dzīves cikla emisijas, tāpēc apritē balstītos iepirkumos siltā asfalta tehnoloģijas var tikt uzskatītas kā videi draudzīgas.

Pētījuma rezultātā izstrādātas rekomendācijas siltā asfalta lietošanai Latvijā, kā arī ieteikumi Ceļu specifikāciju izmaiņām. Tās apkopotas ziņojuma beigās.

# Summary

WMA technologies allow reducing asphalt production and paving temperature as well as improve compatibility at unfavorable conditions. For these reasons, it can be expected that in future WMA will become an important asphalt production method. WMA technologies do not impose any restrictions towards mixture types or constituent materials. However, to ensure a similar performance to hot mix asphalt, the producers need to be aware of the different technologies and the results that can be expected from using each of them.

The literature review part of this research describes the differences between various WMA technologies, outlines the expected mixture properties and compares them with hot mix asphalt as well as provides guidance on WMA mixture design principles.

In the experimental part, a test section was constructed where a WMA surface course was paved next to a HMA. Thermographic cameras and asphalt density gauge were used during paving. Mixture samples were collected to determine performance related properties. For the pavement density was measured using ground penetration radar and road cores. Mixtures were also prepared in laboratory in order to vary compaction temperatures and determine requirements for quality control of WMA.

Overall, the test results indicate that use of WMA technologies allow to reduce the production temperature by at least 20°C without reducing compactability or negatively impacting performance-related properties. To ensure this, the asphalt producer must take into account the best practices of WMA production and during quality control the asphalt should be compacted at the temperature that is used for HMA.

Various scenarios for asphalt paving at unfavourable environmental conditions were compared using a computer simulation. It was determined that use of WMA technologies allow to significantly extend the time available for compaction. This is especially important for wearing courses. Extended compaction time can lead to increased compaction and better compaction homogeneity, consequently leading to an extended pavement life.

It was determined that reduction of production temperature allows reducing life cycle emissions. For this reason, WMA can be considered an environmentally friendly technology.

As a result of the research, recommendations were developed for WMA use in Latvia. They are summarized at the end of this report.

# Saturs

KOPSAVILKUMS.....	5
SUMMARY .....	6
SATURS .....	7
ATTĒLU SARAKSTS.....	9
TABULU SARAKSTS .....	11
SAĪSINĀJUMI .....	12
PROJEKTA MĒRĶIS UN UZDEVUMI .....	13
Darba uzdevumi.....	13
<b>1. LITERATŪRAS APSKATS .....</b>	<b>14</b>
1.1. Ievads.....	14
1.2. Ražošanas tehnoloģijas .....	15
1.2.1. Putu bitumena tehnoloģija.....	15
1.2.2. Ķīmiskās piedevas .....	17
1.2.3. Vaska piedevas .....	17
1.3. Siltā asfalta lietošanas īpatnības .....	18
1.3.1. Ieklāšana .....	19
1.3.2. Ražošana.....	21
1.3.3. Ekoloģija.....	22
1.4. WMA potenciālā lietderība Latvijā.....	22
1.5. Siltā asfalta maisījumu īpašības.....	23
1.5.1. Ūdensjutība.....	23
1.5.2. Plaisāšana.....	24
1.5.3. Risu veidošanās.....	24
1.5.4. Pieredze būvobjektos .....	24
1.6. Maisījumu projektēšana .....	25
1.6.1. Bitumena saturs .....	25
1.6.2. Bitumena klase .....	25
1.6.3. Maisīšana laboratorijā .....	26
1.6.4. Maisīšanas un sablīvēšanas temperatūra.....	27
1.6.5. Novecināšana .....	27
1.7. Atbilstība standartiem un Latvijas specifikācijām.....	27
1.7.1. Eiropas standarti .....	27
1.7.2. Latvijas ceļu specifikācijas 2019 .....	28
<b>2. SILTAIS ASFALTS NELABVĒLĪGOS APKĀRTĒJĀS VIDĒS APSTĀKĻOS.....</b>	<b>29</b>

2.1.	<i>MultiCool</i> programma .....	29
2.2.	Aprēķina parametri .....	30
2.3.	Apakškārta.....	31
2.4.	Virskārta .....	33
<b>3.</b>	<b>IZMĒĢINĀJUMA POSMA IZBŪVE.....</b>	<b>36</b>
3.1.	Testēšanas metodes .....	40
3.1.1.	Termogrāfijas sistēma.....	40
3.1.2.	Grunts penetrācijas radars (GPR) .....	41
3.1.3.	Operatīvais sablīvējuma mērījums.....	41
3.1.4.	Asfalta masas paraugi .....	42
3.1.5.	Urbumi .....	43
3.2.	Termogrāfijas testu rezultāti .....	43
3.2.1.	Riska zonas aprēķins.....	46
3.3.	Sablīvējums.....	47
3.3.1.	Operatīvā sablīvējuma mērījumi .....	48
3.3.2.	Grunts penetrācijas radara testu rezultāti.....	53
<b>4.</b>	<b>EKSPLOATĀCIJAS ĪPAŠĪBU TESTĒŠANAS REZULTĀTI .....</b>	<b>56</b>
4.1.	Testēšanas metodes .....	58
4.1.1.	Granulometrija .....	58
4.1.2.	Vienass stiepes tests (TSRST).....	58
4.1.3.	Riteņa sliedes tests.....	58
4.1.4.	Ūdensjutība.....	58
4.2.	Sablīvējums.....	58
4.3.	Termālā plaisāšana .....	61
4.4.	Riteņa sliedes veidošanās pretestība .....	62
4.5.	Ūdensjutība .....	64
<b>5.</b>	<b>SILTUMNĪCEFĒKTA GĀZU EMISIJAS.....</b>	<b>66</b>
5.1.	Izejmateriālu ieguve.....	67
5.2.	Asfalta ražošana .....	67
5.3.	Siltā un karstā asfalta salīdzinājums ciklā „no šūpuļa līdz vārtiem” .....	69
<b>6.</b>	<b>SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS .....</b>	<b>71</b>
	<b>PATEICĪBAS .....</b>	<b>74</b>
	<b>IZMANTOTĀ LITERATŪRA.....</b>	<b>75</b>
	<b>PIELIKUMS 1. AS "TEEDE TEHNOKESKUS" ATSKAITE PAR TERMOGRĀFIJAS MĒRĪJUMIEM .....</b>	<b>79</b>
	<b>PIELIKUMS 2. MULTICOOL KALKULĀCIJAS PROGRAMMA.....</b>	<b>80</b>



# Attēlu saraksts

Attēls 1. Siltā asfalta izmantošana ASV procentuāli no kopējā saražotā asfalta daudzuma [3].....	14
Attēls 2. Siltā asfalta ražošanas tehnoloģiju popularitāte ASV [3]. .....	15
Attēls 3. Putu bitumena sprauslu darbības piemērs.....	16
Attēls 4. Putu bitumena ūdens tvertne un ūdens padeves sprauslas bitumena padeves līnijā..	16
Attēls 5. Sintētiskais ceolīts. ....	17
Attēls 6. Vaska ietekme uz bitumena viskozitāti. ....	18
Attēls 7. Sasobit vasks.....	18
Attēls 8. Piemērs iestrādāšanas laika atšķirībai, izmantojot WMA tehnoloģiju.....	20
Attēls 9. Izgarojumi ieklāšanas laikā.....	21
Attēls 10. Wirtgen WLB 10 S laboratorijas putu bitumena sagatavošanas iekārta.....	26
Attēls 11. Multicool programmas ekrānšāviņš. ....	30
Attēls 12. Tipiski maisījumu sablīvēšanas intervāli karstajam asfaltam [32]. ....	31
Attēls 13. Apakškārtas sablīvēšanai pieejamais laiks pie dažādiem apstākļiem. ....	33
Attēls 14. Virskārtas sablīvēšanai pieejamais laiks pie dažādiem apstākļiem. ....	35
Attēls 15. AC11 surf darba formula.....	36
Attēls 16. Izmēģinājuma posma atrašanās vieta. ....	37
Attēls 17. HMA-R160(A) un HMA-R160(B) ieklāšana izmantojot antisegregācijas iekārtu. ....	39
Attēls 18. WMA-R160 un WMA-R140 ieklāšana bez antisegregācijas iekārtas.....	39
Attēls 19. Rūpnīcā ražotas asfalta masas paraugu granulometrija. ....	40
Attēls 20. TGA termogrāfijas sistēma. ....	41
Attēls 21. Grunts penetrācijas radars.....	41
Attēls 22. PQI 380 operatīvā sablīvējuma noteikšanas iekārta. ....	42
Attēls 23. Asfalta masas paraugi. ....	43
Attēls 24. HMA-R160 (A).....	44
Attēls 25. HMA-R160(B). ....	44
Attēls 26. WMA-R160 un WMA-R140 posmi. ....	44
Attēls 27. Termogrāfijas vizualizācija posmā, kurā netika izmantotas automašīnas ar termoizolācijas kravas kastis [33]. ....	45
Attēls 28. Temperatūras segregācijas radītu bojājumu piemērs.....	46
Attēls 29. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 45+00.....	49
Attēls 30. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 61+71. ....	49
Attēls 31. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 19+39.....	50
Attēls 32. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 21+00. ....	50
Attēls 33. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 20+85.....	50

Attēls 34. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 19+96. ....	51
Attēls 35. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 18+78.....	51
Attēls 36. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 17+22. ....	51
Attēls 37. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 16+57.....	52
Attēls 38. HMA-R160(B) poru saturs un temperatūra. ....	54
Attēls 39. WMA-R160 un WMA-R140 poru saturs un temperatūra. ....	55
Attēls 40. Laboratorijā sagatavotu maisījumu granulometrija. ....	57
Attēls 41. WMA piedevas pievienošana uzlabo laboratorijas paraugu sablīvējamību, bet temperatūras samazināšana to pasliktina. ....	60
Attēls 42. WMA maisījumu zemas temperatūras plaisāšanas pretestība ir labāka nekā karstajam asfaltam.....	62
Attēls 43. Proporcionālais sliedes dziļums laboratorijā izgatavotiem, rūpnīcā ražotiem paraugiem un urbumiem. Visi maisījumi izgatavoti pēc vienas receptes, bet atšķiras izgatavošanas temperatūra un novecināšanas apstākļi.....	64
Attēls 44. Riteņa sliedes veidošanās slīpums laboratorijā izgatavotiem, rūpnīcā ražotiem paraugiem un urbumiem. Visi maisījumi izgatavoti pēc vienas receptes, bet atšķiras izgatavošanas temperatūra un novecināšanas apstākļi.....	64
Attēls 45. Ūdensjutība laboratorijā izgatavotiem maisījumiem. ....	65
Attēls 46. Dzīves cikla ietekmes aprēķina ietvars saskaņā ar ISO 14040.....	66
Attēls 47. Siltā un karstā asfalta ietekmes uz vidi salīdzināšanas sistēmas robeža.....	67
Attēls 48. Enerģijas patēriņš pie dažādas asfalta ražošanas temperatūras. ....	68
Attēls 49. CO2 izmešu daudzuma pie dažādas ražošanas tehnoloģijas.....	69
Attēls 50. Siltumnīcefekta emisiju (augšā) un enerģijas patēriņš (apakšā) siltajam un karstajam asfaltam pie dažādiem frēzētā asfalta saturiem [38].....	70

# Tabulu saraksts

Tabula 1. Prasības apkārtējā gaisa un pamatnes temperatūrai (Ceļu specifikācijas 2019 6.2-74) .....	31
Tabula 2. Parametri trīs scenāriju aprēķinam apakškārtai .....	32
Tabula 3. Parametri trīs scenāriju aprēķinam plānkārtas asfaltam (virskārtai) .....	34
Tabula 4. Izmēģinājuma posma galvenie raksturojošie rādītāji .....	38
Tabula 5. TGS termogrāfijas sistēmas raksturlielumi pētījuma laikā .....	40
Tabula 6. Termogrāfijas mērījumu riska zonas aprēķins .....	47
Tabula 7. Maisījumu apzīmējumi .....	57
Tabula 8. Tilpuma īpašību testēšanas rezultāti laboratorijā maisītiem paraugiem .....	59

# Saīsinājumi

AC	Asfaltbetons (no angļu val. Asphalt Concrete)
CS	Ceļu specifikācijas
BBR	Bitumena termālās plaisāšanas testēšanas metode (no angļu val. Bending Beam Rheometer)
DSR	Bitumena dinamiskās reoloģijas noteikšanas metode (no angļu val. Dynamic Shear Rheometer)
HMA	Karstais asfalta maisījums (no angļu val. Hot Mix Asphalt)
LVC	VAS „Latvijas Valsts ceļi”
LVS	Latvijas Valsts standarts
PAV	Bitumena ilglaicīgās novecināšanas tests (no angļu val. Pressure Aging Vessel)
PG	Bitumena klasificēšanas sistēma ASV (no angļu val. Performance Grade)
RA	Frēzētais asfalts (no angļu val. Reclaimed Asphalt)
RTFO	Bitumena īslaicīgās novecināšanas tests (no angļu val. Rolling Thin Film Oven Test)
SARA	Ķīmiskais sastāvs (no angļu val. Saturates, Aromatics, Resins, Asphaltenes)
SCB	Puscilindra lieces tests (no angļu val. Semi Circular Bend)
SMA	Šķembu mastikas asfalts (no angļu val. Stone Mastic Asphalt)
TSR	Netiešās stiepes stiprības attiecība ūdensjutības testam (no angļu val. Tensile Stress Ratio)
TSRST	Vienass stiepes tests (no angļu val. Thermal Stress Restrained Specimen Test)
WTT	Riteņa sliedes tests (no angļu val. Wheel Tracking Test)
WMA	Siltais asfalts (no angļu val. Warm Mix Asphalt)

# Projekta mērķis un uzdevumi

Pētījuma mērķis ir demonstrēt siltā asfalta pielietošanas metodes, priekšrocības un trūkumus (īpaši lietošanai nelabvēlīgos laikapstākļos), jāpārbauda šādu maisījumu īpašības, jāpiedāvā metodes siltā asfalta projektēšanai un kvalitātes kontrolei.

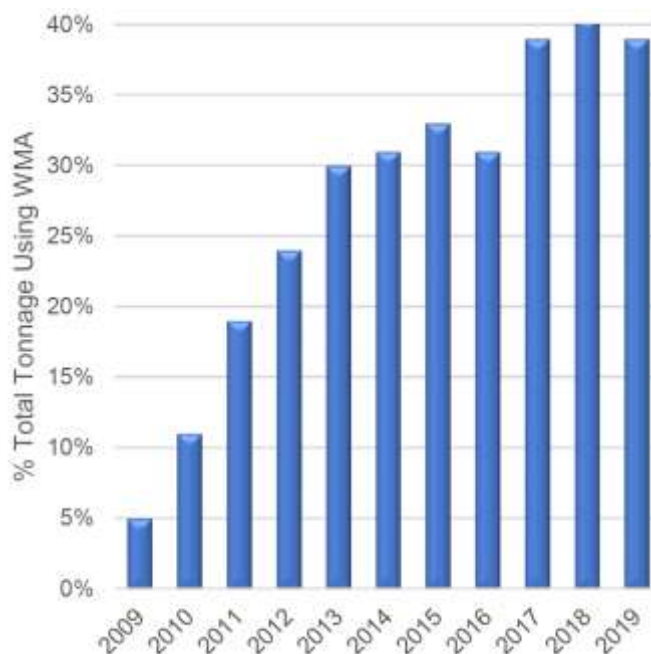
## Darba uzdevumi

1. Literatūras analīze un kopsavilkuma sagatavošana par siltā asfalta tehnoloģijām.
2. Siltā asfalta izgatavošanas un sablīvēšanas parametru noteikšana.
3. Siltā asfalta ekspluatācijas īpašību noteikšana.
4. Siltā asfalta potenciālo priekšrocību noteikšana.
5. Eksperimentālā ražošana un būvniecība, lai noteiktu tehnoloģiskās īpatnības un priekšrocības.
6. Ekoloģiskās ietekmes novērtēšana, ņemot vērā maisījumu īpašības un dzīves ciklu.
7. Priekšlikumu sagatavošana Ceļu specifikāciju papildināšanai.

# 1. Literatūras apskats

## 1.1. Ievads

Siltā asfalta (WMA) ražošanas principi radušies 20. gadsimta 50. gados [1]. Savukārt, mūsdienu siltā asfalta tehnoloģiju aizsākumi meklējami Vācijā pagājušā gadsimta deviņdesmitajos gados, kur siltā asfalta ražošanai tika pielietotas vaska tehnoloģijas. Kopš tā laika ir attīstījušās dažādas tehnoloģijas un 2002. gadā WMA tika ieviests ASV. Šobrīd ASV ir izvirzījies par līderi WMA izmantošanā un 2019. gadā 39% no visa asfalta tika ražots, izmantojot kādu no WMA tehnoloģijām (Attēls 1). Jāatzīmē ka 66% no ASV kompānijām, kas izmanto WMA tehnoloģijas, ražošanas temperatūru nemaz nesamazina [2]. Tā vietā WMA tehnoloģijas tiek izmatotas pie karstā asfalta ražošanas temperatūras, lai uzlabotu asfalta iestrādājamību, sablīvējamību, palielinātu minerālmateriālu un bitumena adhēziju, kā arī dažādu citu priekšrocību dēļ. Šis WMA īpatnības tiks detalizēti apskatītas vēlāk šajā nodaļā.



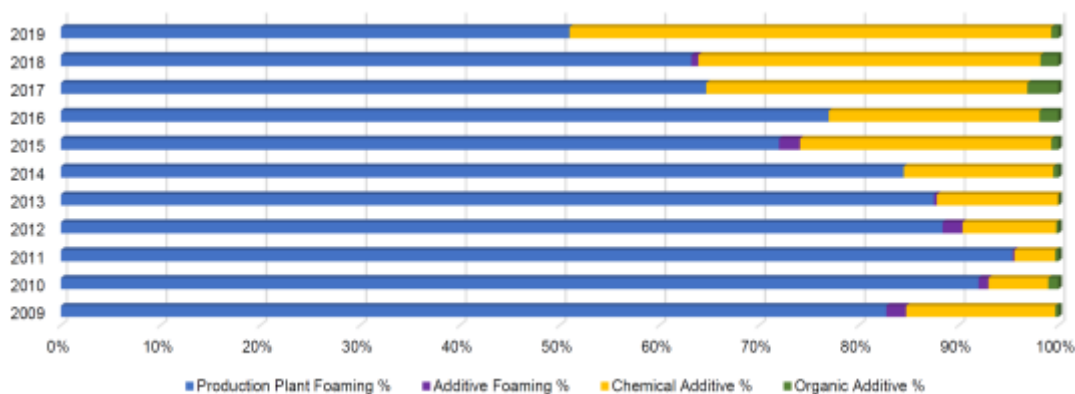
Attēls 1. Siltā asfalta izmantošana ASV procentuāli no kopējā saražotā asfalta daudzuma [3].

Eiropā WMA joprojām ir nišas produkts un tiek izmantots ievērojami mazākos apjomos nekā ASV. Ļoti iespējams, ka arī WMA izmantošanas uzskaitē tiek veikta citādi. ASV par WMA uzskata jebkuru maisījumu, kurā izmantotas WMA tehnoloģijas, bet Eiropā pieņemts uzskatīt, ka WMA ir tikai maisījumi, kas ražoti pie zemākas temperatūras. Turklāt daudzās valstīs statistika nemaz netiek apkopota. Saskaņā ar EAPA statistiku [4] 2017. gadā

visvairāk siltā asfalta maisījumu Eiropā saražoti Francijā, Norvēģijā un Dānijā, kur siltā asfalta maisījumi sastāda 9-11% no kopējā asfalta ražošanas apjoma.

## 1.2. Ražošanas tehnoloģijas

Siltā asfalta ražošanai tiek izmantotas dažādas tehnoloģijas, kas balstās uz bitumena viskozitātes samazināšanu īstermiņā vai ilgtermiņā, kā arī bitumena un minerālmateriālu mijiedarbības ķīmiskas modificēšanas. Pieejamas trīs principiāli atšķirīgas tehnoloģijas, kas īsumā apskatītas šajā nodaļā. Vispopulārākā tehnoloģija ir putu bitumena izmantošana, jo pie lieliem ražošanas apjomiem tā nodrošina vismazākās izmaksas. Jāņem vērā, ka lietojot putu bitumenu būs nepieciešams pievienot arī adhēzijas piedevas, kas izmaksas palielinās. Arvien populārākas kļūst ķīmiskās WMA tehnoloģijas (uzskatāmi redzams 2. Attēlā). Tam par iemeslu ir fakts, ka parasti ķīmiskās piedevas ne tikai ļauj samazināt ražošanas temperatūru, bet arī uzlabo adhēziju. Ja adhēzijas piedeva ir jāpielieto jebkurā gadījumā, izmaksu pieaugums, lai papildus nodrošinātu arī WMA ražošanu, ir salīdzinoši neliels. Trešā tehnoloģija ir organiskās piedevas. Kā iepriekš minēts, tās bija galvenā WMA ražošanas tehnoloģija Vācijā pirmsākumos, bet šobrīd vaska piedevu lietošana ir ievērojami samazinājusies.



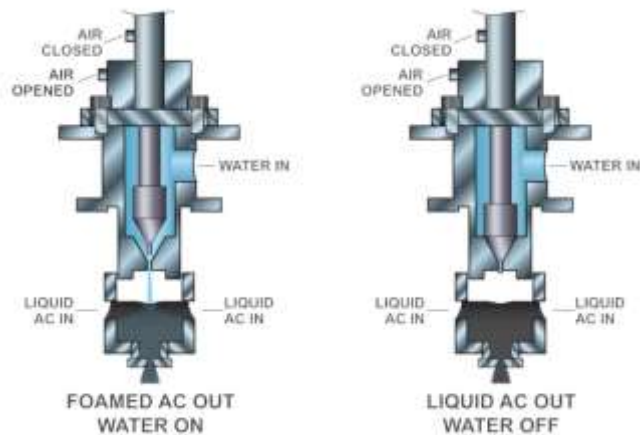
Attēls 2. Siltā asfalta ražošanas tehnoloģiju popularitāte ASV [3].

### 1.2.1. Putu bitumena tehnoloģija

Putu bitumena radīšanai tiek izmantots neliels daudzums ūdens, kas tiek iesmidzināts vai nu bitumenā vai arī nepastarpināti asfalta maisītājā. Šī uzdevuma paveikšanai var tikt pielietotas sprauslas, sintētiskais ceolīts vai daļa no minerālmateriāliem var tikt pievienota mitrā veidā. Saskaroties ar karstu bitumenu, pievienotais mitrums strauji izplešas, palielina bitumena virsmas laukumu un samazina viskozitāti. Tas, savukārt, ļauj labāk pārklāt minerālmateriālus un uzlabot iestrādājamību.

Visbiežāk putu bitumena sagatavošanai tiek izmantotas dažāda veida sprauslas, kas pievienotas bitumena padeves līnijā un tiek kontrolētas caur rūpnīcas vadības sistēmu. Piemērs redzams 3. Attēlā, kur attēlotas "Double barrel green" sprauslas. Lielākā daļa

sprauslu izgatavotāju rekomendē 1-2% ūdens pievienošanu no bitumena masas. Piemērs sprauslām, kas uzstādītas ražotnē redzams 4. Attēlā.



Attēls 3. Putu bitumena sprauslu darbības piemērs.



Attēls 4. Putu bitumena ūdens tvertne un ūdens padeves sprauslas bitumena padeves līnijā.

WMA ražošanai var tikt pielietots arī sintētiskais ceolīts (Attēls 5), kas satur 20% kristalizēta ūdens, kas izdalās pie temperatūras virs 85°C [5]. Parasti to pievieno 0.25-0.30% no asfalta masas un tā darbības laiks ir 6 līdz 7h, līdz viss mitrums ir izgarojis.

Visbeidzot, ir izstrādātas arī dažādas sistēmas, kurās ir izmainīta materiālu padeves secība vai īpašības. Kā piemērs ir zemas enerģijas asfalts ("Low Energy Asphalt"). Izmantojot



šo tehnoloģiju, daļa no materiāliem tiek pievienoti bez žāvēšanas. Iepriekšminētās divas metodes gan ir salīdzinoši mazāk populāras un tādēļ netiks padziļināti apskatītas.



Attēls 5. Sintētiskais ceolīts.

Neatkarīgi no pievienošanas tehnoloģijas, ūdens saturam jābūt salāgotam ar ražošanas temperatūru, lai nodrošinātu, ka tas ir izgarojis pēc maisījuma ieklāšanas un neradītu adhēzijas samazinājumu. Laboratorijā putu bitumenu iespējams izvērtēt pēc diviem parametriem [6]:

- ▽ Izplešanās attiecība: bitumena maksimālā apjoma attiecība pret sākotnējo apjomu.
- ▽ Pussadalīšanās periods: laiks līdz putu bitumena apjoms nokrities līdz pusei no maksimālās vērtības.

Lielāka izplešanās attiecība nodrošinās lielāku bitumena virsmas laukumu, lai pārklātu minerālmateriālus; savukārt lielāks pussadalīšanās periods nodrošinās ilgāku iestrādei pieejamo laiku. Izvēloties optimālo darba formulu, tiek noteikts ūdens saturs, kas nodrošina lielāko izplešanās attiecību un pussadalīšanās periodu.

### 1.2.2. Ķīmiskās piedevas

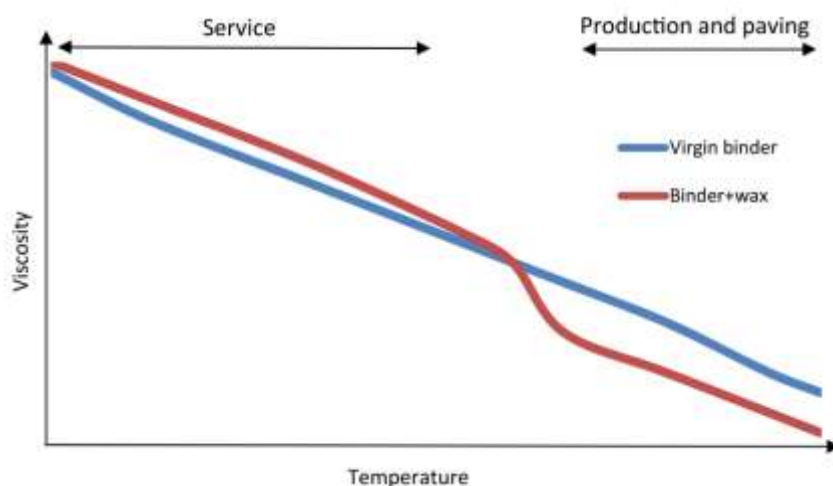
Otra visbiežāk izmantotā siltā asfalta ražošanas tehnoloģiju grupa ir ķīmiskās piedevas. To sastāvs, protams, ir ražotāju noslēpums, tomēr zināms, ka tiek izmatoti emulifikatori, virsmas aktīvās vielas un piedevas, kas uzlabo iestrādājamību. Visbiežāk šīs piedevas arī uzlabo adhēziju starp bitumenu un minerālmateriāliem, tādējādi aizvietojojt adhēzijas piedevu. Parasti ķīmiskās WMA piedevas neizmaina bitumena īpašības un ļauj samazināt ražošanas temperatūru par 20-40°C [7]. Piedevu pievienošanai gandrīz nekad nav nepieciešamas izmaiņas rūpnīcā, jo tās iespējams pievienot pa esošajiem piedevu padeves kanāliem.

### 1.2.3. Vaska piedevas

*Sasobit* ir organiskas izcelsmes piedeva jeb vasks, kas, virs vaska kušanas temperatūras, samazina bitumena viskozitāti. Tas uzlabo minerālmateriālu pārklāšanos ar bitumenu un atvieglo iestrādāšanu. Šis process atļauj samazināt ražošanas temperatūru

par 10-30°C. Sakukārt pēc vaska kristalizācijas vasks palielina bitumena viskozitāti un tādējādi var uzlabot arī maisījuma pretestību pret risu veidošanos [8, 9]. Vaska kušanas un kristalizācijas process redzams 6. Attēlā. Jāņem vērā, ka vasks var arī negatīvi ietekmēt maisījuma īpašības, palielinot plaisāšanas iespējamību, īpaši pie zemas ekspluatācijas temperatūras [8, 10]. Tirgū ir pieejamas arī citas vaska piedevas, tomēr *Sasobit* ir vispopulārākā.

Parasti *Sasobit* tiek pielietots 1.5-3.0% no bitumena masas un pievienošanu vislabāk veikt tieši bitumenā, lai nodrošinātu pēc iespējas labāku samaisīšanos. Piedevu iespējams pievienot arī nepastarpināti asfalta maisītājā, izmantojot speciālu padeves sistēmu vai arī esošu šķiedru padeves sistēmu. Šajā gadījumā jāpārliecinās, vai piedeva ir homogēni iemaisījusies, un tā nodrošināšanai var būt nepieciešams palielināt maisīšanas laiku.



Attēls 6. Vaska ietekme uz bitumena viskozitāti.



Attēls 7. Sasobit vasks.

### 1.3. Siltā asfalta lietošanas īpatnības

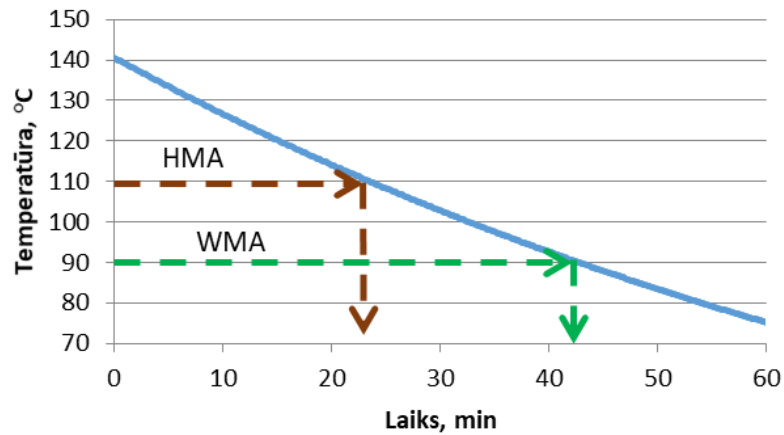
Siltā asfalta tehnoloģijas var nodrošināt dažādas priekšrocības, ko var iedalīt sekojošās grupās:

1. Ieklāšana
2. Ražošana
3. Ekoloģija.

### 1.3.1. Ieklāšana

Plaši izplatīts ir uzskats, ka WMA tehnoloģiju galvenais ieguvums ir ražošanas laikā patērētās enerģijas un siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanās. Tomēr faktiski galvenais iemesls ir iespēja uzlabot asfalta iestrādājamību. Šī priekšrocība ir veicinājusi WMA plašu izplatību visā pasaulē, īpaši ASV. To iespējams izmantot dažādos veidos, atkarībā no situācijas:

- ▽ WMA pielietošana palielina pārliedību, ka tiks sasniegts nepieciešamais sablīvējums nepalielinot blīvēšanas enerģiju. Šis ir galvenais iemesls WMA popularitātei ASV, kur daudzos štatos tiek pielietota bonus-malus sistēma asfalta sablīvējuma novērtēšanā. Ceļu būvnieki tāpēc ir motivēti palielināt asfalta sablīvējumu.
- ▽ Siltā asfalta tehnoloģiju pielietošana var ļaut vieglāk ieklāt un sablīvēt stingus maisījumus, piemēram, augsti polimērmodificētus maisījumus.
- ▽ WMA pielietošana atvieglo ieklāšanu ar rokām, īpaši ja tiek izmantots augstas viskozitātes vai polimērmodificēts bitumens. Tāpēc tehnoloģiju pielietošana var būt rekomendējama blīvi apdzīvotās vietās.
- ▽ Vēl viena priekšrocība ir paildzināts laiks maisījuma iestrādāšanai. Siltā asfalta tehnoloģijas var nodrošināt līdzvērtīgu asfalta sablīvējamību kā karstajam asfaltam, bet pie zemākas temperatūras. Tāpēc ražojot asfaltu pie tradicionālās temperatūras, izmantojot WMA tehnoloģiju, pieejams papildu laiks maisījuma iestrādāšanai [11]. Teorētisks piemērs demonstrēts 8. Attēlā. Šeit pieņemts, ka HMA iestrādāšana jābeidz pie 110°C, bet siltā asfalta iestrādāšana jābeidz pie 90°C. Ja HMA un WMA ražots pie vienādas temperatūras, tad redzams, ka papildus būtu pieejams laiks maisījuma iestrādāšanai. Šāda priekšrocība, piemēram, dod iespēju palielināt transportēšanas distanci [12–14].
- ▽ WMA ļauj veikt būvdarbus salīdzinoši nelabvēlīgākos laikapstākļos. Tas iespējams, ja WMA tiek ražots pie tradicionālas HMA temperatūras, jo WMA pieejams papildu laiks, kurā iespējams asfaltu sablīvēt. Šī iemesla dēļ WMA tehnoloģijas samērā plaši tiek pielietotas ziemeļvalstīs [4], un bieži arī nelabvēlīgos apstākļos pie zemām temperatūrām: augstkalnu apvidū, strādājot naktī, pie zemas pamatnes temperatūras un citiem nelabvēlīgiem laikapstākļiem. Svarīgi, ka šī priekšrocība var atļaut pagarināt būvdarbu sezonu [15].



Attēls 8. Piemērs iestrādāšanas laika atšķirībai, izmantojot WMA tehnoloģiju.

- ▽ WMA tehnoloģijas var tikt izmantotas arī tad, ja ir svarīgi pēc iespējas ātrāk nodot būvobjektu satiksmei, piemēram, veicot darbus uz augstas intensitātes ielām nakts laikā vai strādājot lidostā. Tas ir iespējams, jo WMA tehnoloģijas ļauj ražot asfaltu pie zemākas temperatūras un tādējādi saīsinās laiks, līdz asfalts ir atdzisis pietiekami, lai to varētu atvērt satiksmei. Lee, piemēram, ziņo, ka būvobjekts tika atvērts satiksmei 2 stundas pēc darbu pabeigšanas [16].
- ▽ Kā redzams 9. Attēlā, zemāka ieklāšanas temperatūra nodrošina arī mazāk izmešu un izgarojumu ieklāšanas laikā. Tas nodrošina mazāku ietekmi uz veselību, kas īpaši svarīgi strādājot noslēgtās vietās (tuneļi, angāri) vai apdzīvotās vietās, kurās ir liela kājām gājēju plūsma. Kriech et al. [17] ziņo, ka organisko vielu izmeši ieklāšanas laikā samazinājās par 36% salīdzinājumā ar karsto asfaltu. Brandt et al. [18] savukārt norāda, ka izgarojumi samazinās par 50% pie katra 12°C temperatūras samazinājuma. Tātad, samazinot temperatūru par 25°C (tipisks temperatūras samazinājums, lietojot WMA), izgarojumi samazinās par 75% salīdzinājumā ar karsto asfaltu.



Attēls 9. Izgarojumi ieklāšanas laikā.

### 1.3.2. Ražošana

Gandrīz jebkura esoša asfalta rūpnīca var tikt pielāgota siltā asfalta ražošanai, uzstādot nepieciešamo aprīkojumu (specifiskas tehnoloģijas sīkāk aprakstītas nodaļā 1.2.). Nepieciešamās modifikācijas atkarīgas no izvēlētajām tehnoloģijām:

- ▽ Izmantojot ķīmiskās piedevas modernās rūpnīcās, visbiežāk veiksmīgi var tikt pielietota esošā piedevu padeves sistēma. Vienīgais nosacījums, ka šādā gadījumā nebūs iespējams pievienot vēl kādu piedevu.
- ▽ Izmantojot ūdens tehnoloģijas, būs nepieciešams uzstādīt specializētu aprīkojumu, kas pievienots bitumena padeves līnijai.

Izmantojot siltā asfalta tehnoloģijas, viena no galvenajām priekšrocībām ir iespēja ražošanā pievienot lielāku frēzētā asfalta saturu. Lietojot augstu frēzētā asfalta saturu HMA ražošanas laikā, nepieciešams paaugstināt ražošanas temperatūru. Augstāka temperatūra nodrošina iespēju frēzētā asfalta sastāvā esošajam, novecojušajam bitumenam samazināt viskozitāti pietiekami, lai samaisītos ar svaigajiem minerālmateriāliem. Tomēr to ir grūti nodrošināt, jo frēzēto asfaltu parasti silda netieši – pārkarsējot svaigos minerālmateriālus, kas tālāk siltumapmaiņas ceļā uzsilda frēzēto asfaltu. Šāda tehnoloģija ierobežo maksimālo frēzētā asfalta saturu, ko iespējams uzsildīt.

Pielietojot WMA tehnoloģijas, nepieciešamā maisījuma gala temperatūra ir zemāka nekā izmantojot HMA. Tāpēc lietojot WMA tehnoloģijas, svaigo minerālmateriālu pārkarsēšana var nodrošināt nepieciešamo temperatūru atbilstoši bitumena viskozitātei arī pie lielāka frēzētā asfalta saturā.

Ražojot silto asfaltu, jāņem vērā arī dažādas iespējamās problēmas:

- ▽ Asfalta ūdensjutība var palielināties. Īpaši gadījumā, ja tiek izmantota kāda no ūdens pievadīšanas tehnoloģijām [19].

- ▽ Ja tiek pielietots frēzētais asfalts, jāņem vērā, ka tam ir nepieciešama zināma temperatūra, lai nodrošinātu tā sastāvā esošā bitumena mobilizāciju un sajaukšanos ar svaigajiem minerālmateriāliem. Pārlietu zema temperatūra var neļaut to sasniegt [19].
- ▽ Var būt nepieciešams pārprogrammēt materiālu žāvētāja degli, lai nodrošinātu optimālu degmaisījuma sastāvu. Tas var būt svarīgi, ja ievērojami tiek samazināta ražošanas temperatūra [20]. Pretējā gadījumā iespējama neefektīva kurināmā izmantošana un paaugstināts izmešu līmenis.
- ▽ Siltā asfalta minerālmateriālu mērķa temperatūra var būt zemāka nekā karstajam asfaltam. Nepieciešamo temperatūru iespējams sasniegt vairākos veidos, viens no kuriem ir palielināt materiālu caurplūdes ātrumu žāvētājā. Tas var nodrošināt lielāku rūpnīcas ražību, tomēr jāņem vērā, ka minerālmateriālu pilnīgai izžāvēšanai ir nepieciešams zināms laiks. Ja šis laiks žāvētājā ir par īsu, materiālu porās var saglabāties mitrums, kas neļaus izveidot pietiekamu adhēziju ar bitumenu.
- ▽ Samazināta ražošanas temperatūra var novest pie tā, ka ražošanas laikā nosūktie putekļi (melnie putekļi) joprojām ir mitri un var veidot kondensāciju filtru maisos, kā arī koroziju filtru telpā. Piedāvātās metodes pietiekamas temperatūras nodrošināšanai filtru telpā ietver [7, 21]:
  - maināma ātruma piedziņas uzstādīšana žāvētājam;
  - filtru telpas uzsildīšana pirms temperatūras samazināšanas;
  - filtru telpas siltumizolācija;
  - filtru telpas vēdināšanas uzlabošana;
  - kanālu sildītāju uzstādīšana;
  - pilnīgas minerālmateriālu izžūšanas nodrošināšana;
  - žāvētāja siltumizolācija.

### 1.3.3. Ekoloģija

Ražošanas temperatūras samazināšana var nodrošināt enerģijas patēriņa samazināšanu ražošanas laikā, tādējādi samazinot arī siltumnīcefekta gāzu emisijas un nelabvēlīgo ietekmi uz vidi. Padziļināta analīze par ietekmi uz vidi apskatāma šīs atskaites 5. nodaļā.

## 1.4. WMA potenciālā lietderība Latvijā

Šobrīd Latvijā WMA faktiski netiek pielietots, tomēr no iepriekš apskatītajām siltā asfalta lietošanas priekšrocībām dažas var būt īpaši piemērotas Latvijas apstākļos:

1. Latvijā bieži sastopami asfalta ieklāšanai nelabvēlīgi laikapstākļi – zema gaisa un ceļa seguma pamatnes temperatūra, vējš, mitrums. Siltā asfalta tehnoloģijas ļauj

paildzināt laiku, kurā ir iespējams segumu sablīvēt. Tas savukārt ļauj palielināt blīvumu un samazināt termālo segregāciju un līdz ar to palielināt asfalta kalpošanas laiku.

2. Pielietojot siltā asfalta maisījumus būtu iespējams paildzināt būvdarbu sezonu. Faktiski jau šobrīd bieži būvdarbi tiek veikti pārāk vēlā rudenī. Siltā asfalta pielietošana ļautu uzlabot šādu maisījumu ilgmūžību.
3. Tuvākajā laikā plānotie plānkārtas asfalta maisījumi to samazinātas termālās masas dēļ būs īpaši jutīgi pret nelabvēlīgiem laikapstākļiem. Pat labvēlīgos laikapstākļos tiem var veidoties termālā segregācija. Siltā asfalta pielietošana ļautu uzlabot šādu maisījumu sablīvējamību un seguma viendabību.
4. Siltā asfalta piedevu efekts uz bitumena viskozitātes samazināšanu ir labvēlīgs, lai pielietotu frēzēto asfaltu. Frēzētā asfalta sastāvā esošais bitumens ir novecojies un tāpēc nepieciešama tā viskozitātes samazināšana, lai uzlabotu tā samaisīšanos ar svaigo bitumenu un minerālmateriāliem. Siltā asfalta tehnoloģijas šo procesu var uzlabot.

Šīs četras priekšrocības tiks padziļināti izpētītas šī pētījuma eksperimentālajā daļā.

## 1.5. Siltā asfalta maisījumu īpašības

Lielākā daļa siltā asfalta tehnoloģiju izplatītāju norāda, ka viņu produkts neatstāj nekādu iespaidu uz asfalta kalpošanas īpašībām. Lielā daļā gadījumu tā arī ir, tomēr jāņem vērā dažādas īpatnības, kuru dēļ siltā asfalta īpašības var atšķirties no karstā asfalta.

### 1.5.1. Ūdensjutība

Nepieciešamās adhēzijas nodrošināšana starp bitumenu un minerālmateriāliem ir galvenais jautājums, kam jāpievērš uzmanība, lietojot siltā asfalta maisījumus [22, 23]. WMA tehnoloģiju izmantošana var samazināt adhēziju divu iemeslu dēļ:

- ▽ Samazinot žāvēšanas temperatūru pastāv iespēja, ka neizzūst viss minerālmateriālu sastāvā esošais mitrums.
- ▽ Putu bitumena izmantošanas gadījumā iespējams, ka ne viss ūdens iztvaiko un daļa paliek ieslēgta minerālmateriālu porās.

Šo iemeslu dēļ, kad vien tiek pielietotas siltā asfalta tehnoloģijas un samazināta ražošanas temperatūra, ieteicams lietot adhēziju veicinošas piedevas. Ķīmiskās adhēzijas piedevas un arī hidratētu kaļķu pielietošana literatūrā ir norādītas kā efektīvas metodes, kas novērš problēmas ar ūdensjutību siltā asfalta lietošanas gadījumā [19, 22, 24]. Piemēram, NCHRP projektā 9-43 [19] norādīts, ka ūdensjutības testā attiecība starp mitru un sausu paraugu stiepes stiprību samazinājās līdz 79%, ja tika izmantota WMA tehnoloģija. Tomēr pēc adhēzijas piedevas pievienošanas 67% gadījumu ūdensjutība uzlabojās un nevienā

gadījumā tā nebija zemāka par līdzvērtīga karstā asfalta ūdensjutību. Līdzīgi rezultāti parādīti arī *Wen et al.* pētījumā [25], kur novērots, ka izmantojot adhēzijas piedevu, WMA ūdensjutība ir līdzīga kā karstajam asfaltam.

### 1.5.2. Plaisāšana

Ja siltā asfalta ražošanas laikā tiek ievērojami samazināta temperatūra, maisījuma sastāvā esošais bitumens nebūs novecojies tik ļoti kā pie tradicionālas ražošanas temperatūras [19]. Teorētiski tas var nodrošināt zināmu ilgmūžības pieaugumu, plaisāšanas pretestības palielināšanos, kā arī zināmā mērā kompensēt stinga frēzētā asfalta pievienošanu.

Tomēr jāņem vērā, ka šī samazinātā novecošanās visdrīzāk vairs nebūs novērojama pēc dažiem gadiem uz ceļa. Bitumens novecos uz ceļa laikapstākļu ietekmē. Novecošanas intensitāte būs atkarīga no bitumena izcelsmes vietas un tā novecošanas īpašībām, tomēr vairākos pētījumos apstiprināts, ka dažus gadus pēc ieklāšanas siltā un karstā asfalta īpašības ir līdzvērtīgas [26, 27].

### 1.5.3. Risu veidošanās

Kā jau iepriekšējā sadaļā minēts, pazemināta ražošanas temperatūra var samazināt bitumena novecošanos. Tas, savukārt, teorētiski var novest pie pastiprinātas risu veidošanās neilgi pēc asfalta ieklāšanas. Šāda parādība novērota daudzos pētījumu projektos, kas veikti laboratorijas apstākļos [23, 24, 28]. Tomēr faktiski ceļa posmos, kas ieklāti izmantojot WMA tehnoloģijas, paaugstināta risu veidošanās parasti netiek novērota. Tā, piemēram, NCAT projektā [29] tika novēroti trīspadsmit dažādi maisījumi dažādās klimatiskajās zonās periodā līdz 5,5 gadiem pēc maisījuma ieklāšanas. Šajos būvobjektos caurmērā netika novērota nekāda korelācija starp WMA tehnoloģiju pielietošanu un risu veidošanos. No visiem būvobjektiem lielākais rises dziļums WMA bija 6 mm. Tik pat dziļa rise izveidojās arī paralēlajā posmā, kur ieklāts asfalts, kas ražots ar tradicionālo karstā asfalta ražošanas metodi.

*Wen et al.* [24] pētījumā tika apskatīti 28 ceļa segumi dažādos klimatiskajos apstākļos vecumā no 4 līdz 10 gadiem. Rezultāti neuzrādīja nekādas tendences siltā asfalta lietošanai saistībā ar risu veidošanos.

Ir ļoti iespējams, ka problēmas ar risu veidošanos parādītos tikai sakrītot vairākiem apstākļiem: salīdzinoši zema ražošanas temperatūra, liels ieklātā asfalta biezums un pastiprināta smagas satiksmes intensitāte pirmajos mēnešos pēc maisījuma ieklāšanas.

### 1.5.4. Pieredze būvobjektos



Pārlicinoši lielākajā daļā gadījumu nav novērota nekāda atšķirība starp siltā un karstā asfalta maisījumu īpašībām uz ceļa. Vācijā BAST veica monitoringu sešiem projektiem, kuros izmantots siltais asfalts. Visos gadījumos WMA tika novērtēts kā līdzvērtīgs vai labāks par blakus ieklātajiem HMA kontrolposmiem [7].

EAPA publikācijā "The use of Warm Mix Asphalt" uzskaitīti piemēri no Čehijas, Dānijas, Francijas, Norvēģijas, Turcijas un Zviedrijas, kuros izmantotas dažādas siltā asfalta tehnoloģijas. Nevienā gadījumā nav ziņots par kādām problēmām ar maisījumu iestrādi vai to īpašībām kalpošanas laikā. Vienīgie literatūrā atrodamie gadījumi, kad siltais asfalts nerasniedza nepieciešamo sablīvējumu, saistīti ar nepietiekamu maisījuma temperatūru [13].

Nemot vērā, ka ceļa seguma īpašības ir tādas pašas kā karstajam asfaltam, bet siltajam asfaltam ir zināmas priekšrocības (skatīt nodaļu 1.3.), tad ir sagaidāms, ka siltā asfalta tehnoloģiju izplatība turpināsies.

## 1.6. Maisījumu projektēšana

Siltā asfalta tehnoloģijām nav nekādu ierobežojumu attiecībā uz lietošanu ar dažādiem asfalta tipiem. WMA ir ticis pielietots gan AC, gan SMA, gan PA un mastikas asfalta ražošanai. Tāpat nav principiālu ierobežojumu attiecībā uz lietošanu ar dažādām piedevām, polimērmodificēto bitumenu vai frēzētā asfalta pielietošanu. Tomēr ir daži apsvērumi, kas jāņem vērā, lai izdotos izstrādāt siltā asfalta maisījumu, kam ir līdzvērtīgas īpašības un kalpošanas laiks salīdzinājumā ar tradicionālo asfaltu.

### 1.6.1. Bitumena saturs

Maisījumiem, kas ražoti izmantojot WMA tehnoloģiju, var būt zemāka bitumena absorbcija minerālmateriālos. Tas saistīts ar zemāku ražošanas temperatūru. Tandēmā ar labāku sablīvējamību šī situācija var novest pie zemāka gaispildīto poru satura un saskaņā ar maisījuma projektēšanas principiem var novest pie izšķiršanās lietot zemāku bitumena saturu. Tas nav ieteicams un asfalta industrijā valda vienprātība, ka bitumena samazināšana var novest pie dažādām problēmām, ieskaitot plaisāšanu, paātrinātu novecošanos un ūdensjutības palielināšanos [22]. Šī iemesla dēļ ir pieņemts projektēt karsto asfalta maisījumu un izmantot siltā asfalta tehnoloģiju, nemainot darba formulu.

### 1.6.2. Bitumena klase

Tā kā ražošanā tiek izmantota zemāka temperatūra, pastāv iespēja, ka bitumens noveco mazāk kā karstajā asfaltā. Tas var potenciāli novest pie salīdzinoši mīkstāka maisījuma un izraisīt paliekošas deformācijas (rises). Šāds risks pastāv, ja ir salīdzinoši liela atšķirība starp karstā un siltā asfalta ražošanas temperatūrām, un lielākajā daļā gadījumu

tā nebūs problēma. Precīzu temperatūru, no kuras būtu vērts sākt apsvērt bitumena klases izmaiņas, nepieciešams noteikt katram bitumenam atsevišķi, jo atšķiras bitumenu novecošanas pretestība. NCHRP atskaitē Nr. 691 lietotajiem bitumeniem vidēji šāda nepieciešamība varētu rasties no 30°C, tomēr atšķirības starp dažādiem bitumeniem ir salīdzinoši lielas [19].

### 1.6.3. Maisīšana laboratorijā

Sagatavojot siltā asfalta maisījumus laboratorijā, nepieciešams ņemt vērā dažādas īpatnības. Ķīmisko vai organisko piedevu pievienošana ir salīdzinoši vienkārša. Tās var tikt pievienotas bitumenam pirms tā samaisīšanas ar minerālmateriāliem (ieteicams) vai arī pievienojot asfalta maisījumā (ieteicams, ja šāda metode tiek pielietota arī rūpnīcā).

Putu bitumena radīšana laboratorijas apstākļos, savukārt, ir ievērojami sarežģītāka un pastāv šaubas vai iegūtais rezultāts ir reprezentatīvs rūpnīcā ražotam asfaltam. Sprauslu darbības simulēšana ir sarežģīta un ir nepieciešams speciāls aprīkojums. Piemēram, *Wirtgen* ir izstrādājis iekārtu (Attēls 10), kas zināmā mērā simulē sprauslu darbību rūpnīcā. Tomēr jāņem vērā, ka dažādu ražotāju piedāvātās sprauslas ir ļoti atšķirīgas, un tāpēc ar vienu laboratorijas iekārtu precīzi simulēt dažādos procesus nebūs iespējams.



Attēls 10. Wirtgen WLB 10 S laboratorijas putu bitumena sagatavošanas iekārta.

Otras ūdeni saturošo maisījumu grupas - Ceolīta pievienošana laboratorijas apstākļos - ir salīdzinoši vienkāršāka, jo piedeva ir pieejama pulvera veidā.

Simulēt dažādās tehnoloģijas, kurās tiek izmantoti sekvenciālās maisīšanas principi putu bitumena radīšanai (piemēram, WAM-Foam), laboratorijas apstākļos ir faktiski neiespējami.

#### 1.6.4. Maisīšanas un sablīvēšanas temperatūra

Karstā asfalta ražošanas un ieklāšanas temperatūra ir atkarīga no bitumena viskozitātes. Jo augstāka temperatūra, jo zemāka bitumena viskozitāte. Siltā asfalta tehnoloģiju izmantošanas gadījumā šī attiecība starp temperatūru un viskozitāti izmainīsies un bieži arī nebūs nosakāma (kā piemēram izmantojot putu bitumenu). Ķīmiskās piedevas, piemēram, bieži uzlabo bitumena spēju apklāt minerālmateriālus, kā arī palielina bitumena "slīdamību", tādējādi uzlabojot iestrādājamību. Šīs īpašības viskozitātes tests nespēs noteikt. Tas, savukārt, nozīmē, ka optimālo ražošanas un ieklāšanas temperatūru ieteicams noteikt praktiskos apstākļos izmēģinājuma posmā būvobjektā.

Arī maisījuma sablīvējamības testēšana laboratorijā var nenodrošināt gaidīto rezultātu. Tas saistīts ar sablīvēšanas metožu īpatnībām, jo tās nespēj precīzi simulēt apstākļus būvobjektā. Piemēram žiratora sablīvētājs ir salīdzinoši nejūtīgs attiecībā pret temperatūras izmaiņām [23]. Māršala sablīvētājs ir jutīgāks pret temperatūras izmaiņām, tomēr tas nenodrošina minerālmateriālu daļiņu bīdes kustību, kas raksturīga sablīvējot ar veltņi. Tāpēc simulēt uzlabotu bitumena "slīdamību" Māršala sablīvētājs nespēs. Šo iemeslu dēļ šajā pētījumā tiek izmantots arī veltņa blīvētājs, kas var salīdzinoši tuvāk simulēt faktiskos sablīvēšanas apstākļus uz ceļa.

#### 1.6.5. Novecināšana

Lai gan ir zināms, ka rūpnīcā un ieklāšanas laikā asfalts noveco, laboratorijā sagatavotiem maisījumiem novecināšana laboratorijā tradicionāli netiek veikta. Tas ir pieņemami, ja ražošanas temperatūra un bitumena novecošanas īpašības ir salīdzinoši konstantas. Siltais asfalts, savukārt, tiek ieklāts pie zemākas temperatūras un tāpēc tas ir mazāk novecojis. Šī atšķirība jāņem vērā izvērtējot plastisko deformāciju rašanos varbūtību, un tāpēc šī pētījuma ietvaros notiek eksperiments ar maisījumu novecināšanu.

Novecināšana ir īpaši svarīga maisījumiem, kas sagatavoti izmantojot putu bitumena tehnoloģijas. Šajā gadījumā maisījumu nevajadzētu testēt uzreiz pēc parauga noņemšanas, bet gan dot laiku bitumena sastāvā esošajam ūdenim izgarot.

### 1.7. Atbilstība standartiem un Latvijas specifikācijām

#### 1.7.1. Eiropas standarti

Eiropas standarti "Bitumenizētie maisījumi" (EN 13108 -1 līdz -7) neierobežo siltā asfalta lietošanu. EN nosaka maksimālo temperatūru atsevišķiem maisījumiem, bet neierobežo minimālo temperatūru. To nosaka asfalta ražotājs. Standartos ir arī sadaļas par piedevu pievienošanu, kur noteikts, ka jānodrošina vismaz līdzvērtīgas īpašības kā references maisījumam. To ir iespējams demonstrēt, veicot ekspluatācijas īpašību

testēšanu laboratorijā vai veicot izmēģinājuma posma izbūvi. Šo iemeslu dēļ Eiropas standarti nevar tikt uzskatīti par ierobežojumu siltā asfalta lietošanai.

### 1.7.2. Latvijas ceļu specifikācijas 2019

Tā kā Latvijā siltā asfalta maisījumi līdz šim izmantoti ļoti reti, tad arī Ceļu specifikācijas (CS) sastādītas, neņemot vērā WMA tehnoloģiju iespējamo lietošanu. Šeit apkopoti CS punkti, kuros nepieciešams veikt izmaiņas, lai ļautu pielietot WMA tehnoloģijas.

- ▽ Ieteicams pievienot definīciju siltajam asfaltam. Pārsvārā ceļu administrācijas izvairās norādīt konkrētu temperatūru, pie kuras definēt silto asfaltu. Tā vietā definīcijā tiek norādīts, ka ražošanā tiek pielietotas siltā asfalta tehnoloģijas. Tomēr ieteicams definēt arī temperatūru. Tas nodrošinātu iespēju silto asfaltu uzskatīt kā videi draudzīgu tehnoloģiju (skatīt 6. nodaļu). Definīcijas piedāvājums:

Tehnoloģijas, kas samazina ražošanas temperatūru par vismaz 20°C salīdzinājumā ar attiecīgo karsto asfaltu. Šādi ražots asfalts var tikt pielietots kā alternatīva karstajam asfaltam.

1. Ceļu specifikācijās 2019 piedevu lietošana ir atļauta, lai arī specifiski siltā asfalta piedevas nav norādītas. Tabulās 6.2-13, -50, -66 un 6.3-1 norādīta projektēšanas temperatūra, tomēr ražotājam dota iespēja izvēlēties citu projektēšanas temperatūru, ja tiek pielietotas piedevas. Šī prasība ir pamatota, jo, lai gan silto asfaltu iespējams ražot arī bez piedevu pievienošanas, projektēšana šādiem putu bitumenu saturošiem maisījumiem būtu jāveic pie karstā asfalta temperatūras. Tikai ražošanas laikā temperatūra tiek samazināta.
2. Tabulā 6.2-75 norādīta asfalta maisījuma maksimālā ražošanas temperatūra. Tātad principiāli ir atļauta temperatūras samazināšana. Punktā 6.2.6.4.1 gan nepieciešams veikt nelielu izmaiņu – siltā asfalta lietošanas gadījumā mērķa temperatūru būtu jānosaka asfalta maisījuma, nevis piedevu ražotājam. Tas dotu iespēju izvēlēties atbilstošāko temperatūru konkrētajiem apstākļiem un pievienotās piedevas daudzumam.
3. Siltā asfalta lietošanas veicināšanai ieteicams pievienot atsauci uz šo tehnoloģiju arī aprakstos pie Tabulām 6.2-13, -50, -66 un -75. Tas ražotājiem un pasūtītājam dotu informāciju par šādu tehnoloģiju esamību un iespēju tās pieprasīt.

## 2. Siltais asfalts nelabvēlīgos apkārtējās vides apstākļos

Viena no galvenajām priekšrocībām siltā asfalta pielietošanai Latvijā ir potenciāls iekļāt asfaltu pie nelabvēlīgiem apkārtējās vides apstākļiem un līdz ar to arī iespēja pagarināt būvdarbu sezonu. Tas iespējams, jo silto asfaltu var turpināt sablīvēt pie zemākas temperatūras un arī termālās segregācijas ietekme ir mazāk izteikta.

Šajā nodaļā veikts aprēķins par to, kādas priekšrocības varētu būt sagaidāmas, karstā asfalta vietā pielietojot siltā asfalta ražošanas tehnoloģijas. Teorētisks aprēķins izvēlēts kā labākā metode, jo uzticamu simulāciju ar maisījumu atdzišanu laboratorijas apstākļos veikt nav iespējams. Savukārt, pilna apjoma ražošanā to ir sarežģīti izdarīt daudzu mainīgo un lielo ražošanas apjomu dēļ, kas novestu pie nesamērīgām izmaksām.

### 2.1. *MultiCool* programma

Aprēķinam izmantota programma *MultiCool* (pievienota kā pielikums šai atskaitei) [30]. Programmas izstrādi sponsorējis ASV Nacionālais asfalta tehnoloģiju centrs (NCAT). Tā ir izstrādāta un pārbaudīta ASV Minesotas un Kalifornijas štatos. Šajos štatos ir ļoti atšķirīgi laikapstākļi, tāpēc programmu var uzskatīt par salīdzinoši robustu un piemērotu dažādiem klimatiskajiem apstākļiem, tajā skaitā Latvijai.

Programma ļauj noteikt maisījuma atdzišanas laiku atkarībā no asfalta temperatūras un ārējās vides apstākļiem, ieskaitot pamatnes temperatūru, vides temperatūru un citus parametrus. Aprēķina rezultāts ir sablīvēšanai pieejamais laiks līdz norādītajai minimālajai sablīvēšanas temperatūrai. Tāpat iespējams iegūt seguma atdzišanas laika līkni.

Pieejama gan programmas instalācija datoram (pievienota pielikumā), gan mobilā aplikācija Android telefoniem (<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.AUcivil.MC2&hl=en>), gan interneta versija (<http://www.eng.auburn.edu/users/timmdav/MultiCool/FinalRelease/Main.html>). Ekrānšāviņš ar programmas datorprogrammas logu dots 11. Attēlā.

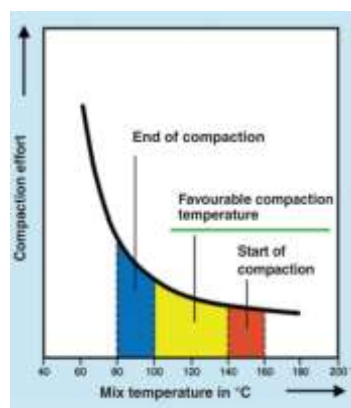


Attēls 11. Multicool programmas ekrānšāviņš.

## 2.2. Aprēķina parametri

Aprēķina veikšanai noteikti vairāki bāzes pieņēmumi (nemainīgā daļa), kas izmantoti visos turpmākajos aprēķinos:

- ∇ Lokācijas vieta: Rīgas apvedceļš blakus Ķekavas aplim (Ķekavas apvedceļa paredzētā trases vieta): 56.809099 N, 24.196146 E.
- ∇ Bitumena PG klase: saskaņā ar LVC pētījumu [31] Latvijā bieži izmantotais 50/70 klases bitumens atbilst PG 70-22 klasei (programmā jāievada PG klasi).
- ∇ Minimālā optimālā sablīvēšanas temperatūra karstajam asfaltam pieņemta 100°C. Lai arī sablīvēšanu iespējams veikt arī pie zemākas temperatūras, šādā gadījumā sagaidāma sablīvēšanās efektivitātes samazināšanās. Tas redzams arī sablīvēšanas rekomendācijā no Bomag [32] (Attēls 12).



Attēls 12. Tipiski maisījumu sablīvēšanas intervāli karstajam asfaltam [32].

- ▽ Minimālā sablīvēšanas temperatūra siltajam asfaltam pieņemta 85°C jeb 15°C zemāka nekā karstajam asfaltam. Pieņemts, ka pie šādas temperatūras sablīvēšanas efektivitāte ir līdzvērtīga kā karstajam asfaltam, kas sablīvēts pie 100°C.

Aprēķinu mainīgajā daļā kā atskaites punkts izmantotas prasības Ceļu specifikācijās 2019, kas redzamas 1. Tabulā.

Tabula 1. Prasības apkārtējā gaisa un pamatnes temperatūrai (Ceļu specifikācijas 2019 6.2-74).

Konstruktīvās kārtas nosaukums	Konstruktīvās kārtas nosaukums	Minimālā gaisa temperatūra, °C	Maksimālais vēja ātrums, kad ir minimālā gaisa temperatūra, m/s	Minimālā pamatnes temperatūra, °C
Seguma apakškārtas	≥70	2	12	2
Visas kārtas	>60	5	12	10
	40-60	10	12	10
	<40	15	3	15

Izmantojot šo tabulu, modelēti trīs dažādi scenāriji:

- ▽ Scenārijs "Pieļaujams": minimālās pieļaujamās prasības saskaņā ar Ceļu specifikāciju 2019 6.2-74 attiecīgajai segas kārtai.
- ▽ Scenārijs "Optimāls": optimāli laikapstākļi asfalta darbu veikšanai Latvijā.
- ▽ Scenārijs "Nelabvēlīgs": nelabvēlīgi laikapstākļi vēlā rudenī, kad dažkārt nākas veikt iekavētos darbus, lai nodrošinātu satiksmi vai nodotu būvobjektu. Šie parametri ir zemāki nekā pieļaujams saskaņā ar Ceļu specifikācijām.

Aprēķini atsevišķi veikti virskārtas un apakškārtas izbūvei. Konkrēti parametri, kas aprēķinos izmantoti, katrā no scenārijiem tika apkopoti attiecīgajā nodaļā.

## 2.3. Apakškārta

Izmantojot *Multicool* programmu veikts aprēķins pieejamajam sablīvēšanas laikam pie dažādiem scenārijiem asfalta segas apakškārtai. 2. Tabulā apkopoti mainīgie raksturlielumi trīs scenārijiem. Jānorāda, ka šajā gadījumā tiek pieņemts, ka siltā asfalta

tehnoloģijas tiek izmantotas kā viegliestrādājamības piedeva, tāpēc WMA piegādes temperatūra būvobjektā ir tāda pati kā karstajam asfaltam.

Tabula 2. Parametri trīs scenāriju aprēķinam apakškārtai.

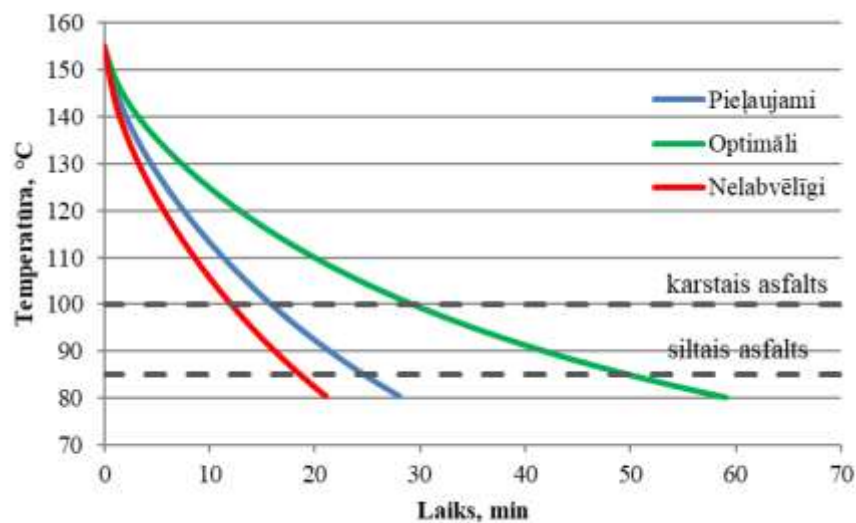
Parametrs	Apstākļi apakškārtas ieklāšanai		
	Pieļaujami	Optimāli	Nelabvēlīgi
Kārta	Apakškārta	Apakškārta	Apakškārta
Pamats	Nesaistītā kārta (nesasalusi, mitra)	Nesaistītā kārta (nesasalusi, mitra)	Nesaistītā kārta (nesasalusi, mitra)
Pamatnes temperatūra	2°C	20°C	-2°C
Gaisa temperatūra	2°C	20°C	0°C
Vēja ātrums	12 m/s	3 m/s	12 m/s
Debesis	Nomākušās	Skaidras	Nomākušās
Maisījuma tips	AC	AC	AC
Kārtas biezums	70mm	70mm	70mm
Piegādes temperatūra	155°C	155°C	155°C

Aprēķina rezultāti apkopoti 13. Attēlā. Redzams, ka pieļaujamu laikapstākļu gadījumā pieejamais laiks sablīvēšanai ir divtik īsāks salīdzinājumā ar pieļaujamiem laikapstākļiem. Tātad risks ieklāt nepietiekami sablīvētu asfaltu ir daudz augstāks. Ja tiktu pielietotas siltā asfalta tehnoloģijas, tad šāda maisījuma ieklāšanai būtu pieejams ilgāks laika posms. Piemēram, "Pieļaujami" scenārijā WMA sablīvēšanai pieejamais laiks palielinātos par gandrīz 10 minūtēm jeb 50%.

Tāpat attēlā var novērot, ka laiks, kas atbilst minimālai veltīšanas temperatūrai siltajam asfaltam "Pieļaujami" scenārijā ir gandrīz tikpat ilgs kā laiks, kas pieejams karstajam asfaltam "Labvēlīgi" scenārijā. Citiem vārdiem sakot, siltā asfalta pielietošana nelabvēlīgos apstākļos nodrošina gandrīz līdzvērtīgu laiku maisījuma sablīvēšanai kā karstajam asfaltam labvēlīgos laikapstākļos.



Balstoties uz šiem rezultātiem, ieteicams pieprasīt siltā asfalta tehnoloģiju lietošanu apstākļos, kas ir tuvu paļaujamai robežai. Un noteikti pieprasīt nelabvēlīgos laikapstākļos.



Attēls 13. Apakškārtas sablīvēšanai pieejamais laiks pie dažādiem apstākļiem.

## 2.4. Virskārta

Tabulā 3 apkopoti mainīgie raksturlielumi trīs dažādiem scenārijiem asfalta virskārtai. Kā piemērs virskārtai ņemts plānkārtas asfaltbetons, jo nesēn LVC uzdevumā veikts pētījums par šāda tipa maisījumu ieviešanu Latvijā.

Plānkārtas asfalta sablīvēšanai pieejamais laiks būs īsāks nekā pieejamais laiks tipiskam virskārtas asfaltam, jo tā termālā masa ir mazāka. Līdz ar to arī nepietiekamas sablīvēšanas risks ir augstāks un nepieciešams pievērst lielāku uzmanību nepieciešamā blīvuma nodrošināšanai.

Tabula 3. Parametri trīs scenāriju aprēķinam plānkārtas asfaltam (virskārtai).

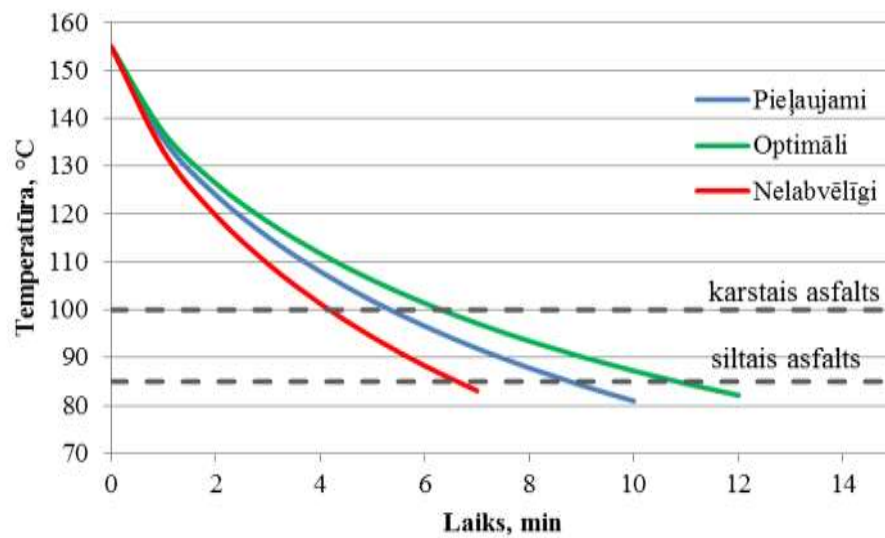
Parametrs	Apstākļi apakškārtas ieklāšanai		
	Pieļaujami	Optimāli	Nelabvēlīgi
Kārta	Virskārta	Virskārta	Virskārta
Pamats	Asfalta kārta (nesasalusi, mitra)	Asfalta kārta (nesasalusi, mitra)	Asfalta kārta (nesasalusi, mitra)
Pamatnes temperatūra	10°C	20°C	2°C
Gaisa temperatūra	5°C	20°C	5°C
Vēja ātrums	3 m/s	3 m/s	12 m/s
Debesis	Nomākušās	Skaidras	Nomākušās
Maisījuma tips	AC	AC	AC
Kārtas biezums	30mm	30mm	30mm
Piegādes temperatūra	155°C	155°C	155°C

Laiks, kas pieejams maisījuma sablīvēšanai, ilustrēts 14. Attēlā. Redzams, ka kopumā pieejamais laiks sablīvēšanai ir daudz īsāks nekā apakškārtai. Ja apakškārtās labvēlīgos apstākļos HMA sablīvēšanai pieejamas 30 minūtes, tad plānkārtas asfaltam vien 6 līdz 5 minūtes. Iemesls šādai atšķirībai ir daudz mazāks kārtas biezums un līdz ar to straujāka atdzišana.

Attēls 14 arī redzams, ka atšķirība starp dažādiem scenārijiem ir vien dažas minūtes. Redzams, ka siltā asfalta tehnoloģiju pielietošana nodrošina daudz lielāku ieguvumu, nekā atšķirība starp labiem un pieļaujamiem laikapstākļiem karstajam asfaltam. Siltā asfalta pielietošana dod ap 5 minūšu ieguvumu, kamēr atšķirība starp optimāliem un pieļaujamiem laikapstākļiem ir tikai 1 minūte. Procentuāli siltā asfalta tehnoloģiju pielietošana pagarina ieklāšanai pieejamo laiku par aptuveni 50%.

Tā kā Latvijā bieži vērojami nepastāvīgi laikapstākļi, kas var ievērojami atšķirties pat vienas dienas laikā, ieteicams izvirzīt prasību visus plānkārtas asfaltbetonus ieklāt, izmantojot viegliestrādājamības piedevas (siltā asfalta tehnoloģiju ar vai bez temperatūras

samazināšanas). Tas palīdzētu nodrošināt nepieciešamo sablīvējumu un tādējādi palielināt seguma kalpošanas ilgumu.



Attēls 14. Virskārtas sablīvēšanai pieejamais laiks pie dažādiem apstākļiem.

### 3. Izmēģinājuma posma izbūve

Lai pārbaudītu siltā asfalta tehnoloģijas praksē, tika izbūvēts izmēģinājuma posms uz Autoceļa V1432 Cēre-Pilsarāji-Gobas km 1,640-2,140 un uz autoceļa V1447 Cēres apvedceļš km 4,240-4,750. Visā šajā posmā tika ieklāts AC11 surf tipa asfalts. Darba formula redzama 15. Attēlā.

Materiāla nosaukums, ražotājs vai piegādātājs			Frakcija (mm)	Daudzums (masas %)	Daudzums (masas %maisīj.)
a/s, Dolomitas*(Lietuva)dolomīta šķembas			8/11	20	19
a/s, Dolomitas*(Lietuva)dolomīta šķembas			5/8	15	14,2
a/s, Dolomitas*(Lietuva)dolomīta šķembas			2/5	10	9,5
SIA EURO SKANDI AJŪTO atradne „Kariers”drupināta smiltis			0/4	47,5	45
Minerālais pulveris(Sāni LM)				7,5	7,1
Bitumens ORLEN 50/70(Lietuva)				5,5	5,2
Adhēzijas piedeva Adhezijs			0,5% no bit.daudz.	0,5	0,5

2.Asfalta maisījums un asfalta īpašības.

Sieti, mm	Cauri izsijātā materiāla daudzums	Deklarētā vērtība	Īpašība, mērvienība	Testēšanas metode	Rezultāts	Dekl. vērtība
45			<b>Asfalts:</b>			
31,5			- minerālmateriālu daļiņu blīvums, Mg/m <sup>3</sup>	LVS EN	2,742	
22,4			- asfalta tilpumbļīvums, Mg/m <sup>3</sup>	LVS EN 12697-6, B piešķirums	2,409	
16			- asfalta maksimālais blīvums, Mg/m <sup>3</sup>	LVS EN 12697-5, A metode	2,492	
11,2	97,4	-8+5	- poru saturs, %	LVS EN 12697-8	3,3	1,5-4,0
8	81,0		- ar bitumenu piepildīto poru daudzums, %	LVS EN 12697-8		-
5,6	66,7		- saistvielas notecē, %	tikai SMA un PA	LVS EN 12697-18	-
4	54,9	+7	- netiešās stiepes stiprības vērtība(ūdensjūtība), %	LVS EN 12697-12	75	/70
2	35,8	+8	- Minimālais stingums,MPa	LVS EN 13108-20,D 8	-	-
1	26,0		- Maksimālais stingums,MPa	LVS EN 13108-20,D 2	-	-
0,5	19,5	+4	- Nogurumizturība,mikrostrain	tikai AC	-	-
0,063	7,0	+2	- izturība pret palielošām deformācijām (WTS),tikai AC un SMA,maksimālais rēķina slēdes slēpums mm uz 10 <sup>6</sup> slēdzes ciklu	LVS EN 12697-22, pie 60°C, 10000 cikli	/0,12	/ 0,80
			- Proportcionālais slēdes dziļums PRD <sub>adm</sub> , %		8,9	/16
			- porasfalta daļiņu zudums, % tikai PA	LVS EN 12697-17	-	-
<b>Informācija par paraugu sagatavošanu un testēšanu:</b>						
			- parauga sagatavošana atsaucēs blīvumam	LVS EN 12697-30; LVS EN 13108-20 C,1,2		
			- blīvēšanas temperatūra, °C			140°
			- Maršala triecienu skaits(no katras puses)			2x50
			-saistvielas atgūšanas nosacījumi			
<b>Režģošana:</b>						
			- maisījuma sagatavošanas temperatūra			140-180°C
<b>Ieklāšana:</b>						
			- minimālais kārtas biezums, mm			
			- maksimālais kārtas biezums, mm			

Attēls 15. AC11 surf darba formula.

Izmēģinājuma posma novietojums redzams 16. Attēlā. Ieklāšana tika veikta divas dienas – 2019. gada 27. un 28. jūnijā. Pirmajā dienā tika ieklāts karstais asfalts (HMA), bet otrajā dienā tika ieklāts asfalts ar *Evotherm* piedevu (0.4% no bitumena masas). Posmā tika izmēģinātas trīs dažādas situācijas:

1. Asfalts, kas ražots un ieklāts pie tradicionālas temperatūras, neizmantojot nekādas piedevas. Šis kontroles posms bija aptuveni 1510 m garš. Divi atsevišķie nogriežņi turpmāk tiks apzīmēti kā HMA-R160 (A) un HMA-R160 (B) ("160" šajā abreviatūrā norāda ražošanas temperatūru).
2. Asfalts, kas ražots un ieklāts pie tradicionālas temperatūras un tā ražošanā tika pielietota siltā asfalta piedeva Evotherm. Šis posms bija aptuveni 200 m garš un tas turpmāk tiks apzīmēts kā WMA-R160.
3. Asfalts, kas ražots un ieklāts pie samazinātas temperatūras un kura ražošanā pielietota siltā asfalta piedeva Evotherm. Šis posms bija aptuveni 200 m garš un tas turpmāk tiks apzīmēts kā WMA-R140.



Attēls 16. Izmēģinājuma posma atrašanās vieta.

Izmēģinājuma posma galvenie raksturlielumi apkopoti 4. Tabulā. Karstā asfalta ieklāšanas mērķa temperatūra bija 160°C, bet siltā asfalta 140°C. Gaisa temperatūra abas dienas bija līdzīga, bet vēja ātrums brāzmās bija ļoti liels. Otrajā dienā (WMA-R160 un WMA-R140 posmi) tas pat palielinājās salīdzinājumā ar pirmo dienu (HMA-R160 (A) un (B)). Šādi apstākļi bija pateicīgi pētījuma veikšanai, jo nodrošināja iespēju izvērtēt siltā asfalta

priekšrocības pie nelabvēlīgiem laikapstākļiem (pie liela vēja ātruma asfalts atdziest straujāk).

Abas dienas tika izmantotas termoizolācijas kravas kastes, kuru uzdevums ir nodrošināt salīdzinoši mazākas temperatūras atšķirības piegādātajam asfaltam. Attālums līdz rūpnīcai bija aptuveni 27 km un ceļā pavadītais laiks ap 40 minūtēm.

Tabula 4. Izmēģinājuma posma galvenie raksturojošie rādītāji.

Posms	WMA piedeava	Iekļāšanas mērķa temperatūra	Anti- segregācijas iekārta	Termoiz- olācijas kravas kaste	Gaisa temperatū- ra*	Vējš*
HMA- R160(A&B)	Nav	160 °C	Jā	Jā	18°C	6 m/s (brāzmās 13 m/s)
WMA- R160	Evotherm	160 °C	Nē	Jā	17°C	8 m/s (brāzmās 13 m/s)
WMA- R140	Evotherm	140 °C	Nē	Jā	17°C	8 m/s (brāzmās 13 m/s)

\*Dati no Jelgavas stacijas

Pirmajā dienā, iekļājot HMA-R160 (A) un HMA-R160 (B) posmus, tika izmantota antisegregācijas iekārta kā redzams 17. Attēlā. Otrajā dienā, kad tika izmantota *Evotherm* piedeava (WMA-R160 un WMA-R140 posmi), antisegregācijas iekārta netika pielietota (Attēls 18). Tas tika darīts ar nolūku novērtēt iespēju antisegregācijas iekārtas vietā pielietot siltā asfalta piedevas. Plašāk šī hipotēze tiks apskatīta rezultātu sadaļā.

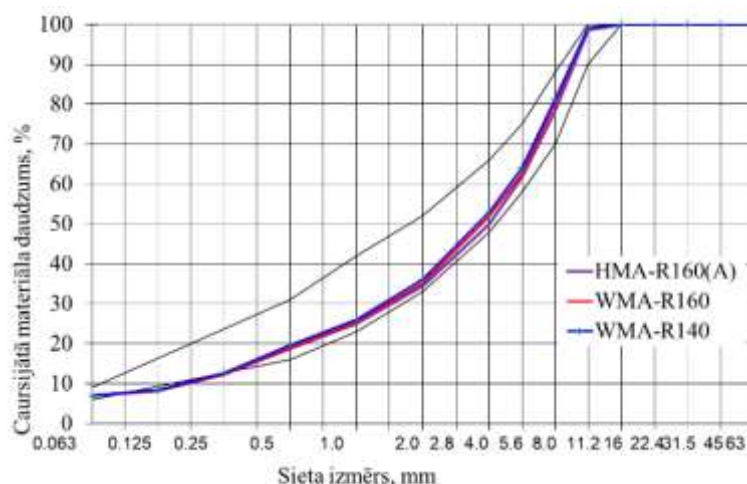


Attēls 17. HMA-R160(A) un HMA-R160(B) ieklāšana izmantojot antiseģregācijas iekārtu.



Attēls 18. WMA-R160 un WMA-R140 ieklāšana bez antiseģregācijas iekārtas.

Attēlā 19 apkopoti granulometrijas testēšanas rezultāti siltajam un karstajam asfaltam. Redzams, ka paraugu granulometrija ir līdzvērtīga un tāpēc to var neņemt vērā rezultātu izvērtēšanā.



Attēls 19. Rūpnīcā ražotas asfalta masas paraugu granulometrija.

### 3.1. Testēšanas metodes

#### 3.1.1. Termogrāfijas sistēma

Asfalta ieklāšanas temperatūra tika nepārtraukti novērota, izmantojot TGS termogrāfijas sistēmu. Iekārtas galvenie raksturlielumi norādīti 5. Tabulā. Iekārta tika uzstādīta pie asfalta ieklājēja augšējās sijas kā redzams 20. Attēlā.

Testēšanu nodrošināja sadarbības partneri AS "Teede Tehnokeskus". Mērījumu rezultāti apkopoti šajā nodaļā, bet pilna atskaite angļu valodā pieejama pielikumā.

Tabula 5. TGS termogrāfijas sistēmas raksturlielumi pētījuma laikā.

Parametrs	Prasība
Novietojums	±0,1 m izmantojot RTK
Mērījumu platums	6 m
Mērījumu biežums	Ap 0,1 m šķērsvirzienā un garenvirzienā
Mērījuma attālums no ieklājēja	Ap 4,3 m
Temperatūras diapazons	0-180 °C
Temperatūras sensora nenoteiktība	±2%
Nepārtraukti mērījumi	Jā
Foto fiksācijas	Ik pēc 1 m
Rezultātu formāts	.csv datiem un .jpg fotouzņēmumiem





Attēls 20. TGA termogrāfijas sistēma.

### 3.1.2. Grunts penetrācijas radars (GPR)

Lai noteiktu ieklātā asfalta sablīvējumu visā ceļa posmā, tika izmantots VAS „Latvijas Valsts ceļi” rīcībā esošais grunts penetrācijas radars „Road Doctor Survey Van” (Attēls 21). GPR mērījums veikts ar divām 2 GHz antenām un šajā atskaitē iekļautie rezultāti ir kalibrēti pēc urbto paraugu testēšanas rezultātiem. Mērījums veikts labās puses rīses vietā. Mērījuma nenoteiktība ir 1%.



Attēls 21. Grunts penetrācijas radars.

### 3.1.3. Operatīvais sablīvējuma mērījums

Sablīvējums ieklāšanas laikā tika mērīts, izmantojot “Transtech PQI 380” iekārtu (Attēls 22). Tās darbībā izmantots elektriskās pretestības princips.

Standarta gadījuma mērījumus veic, aprēķinot vidējo rezultātu no pieciem mērījumiem. Šī pētījuma ietvaros viens no PQI iekārtas izmantošanas uzdevumiem bija noteikt sablīvējuma izmaiņas pēc katra veltņa pārbrauciena. Atsevišķos gadījumos piecus mērījumus nebija iespējams veikt, jo laika posms pirms nākamā veltņa pārbrauciena bija pārāk īss. Šī iemesla dēļ testēšana tika veikta viena mērījuma režīmā, bet kad vien tas bija iespējams netraucējot sablīvēšanas procesu, tika veikti vismaz pieci sekojoši mērījumu vienā vietā un šajā atskaitē ir norādīts vidējais rezultāts. Gadījumos, kad tika veikti mazāk par pieciem mērījumiem, ziņojumā iekļautais rezultāts ir vidējais no visiem veiktajiem mērījumiem.

Šajā ziņojumā iekļautie PQI rezultāti ir kalibrēti saskaņā ar konkrētajā vietā grunts penetrācijas radaru noteikto sablīvējumu.



Attēls 22. PQI 380 operatīvā sablīvējuma noteikšanas iekārta.

#### 3.1.4. Asfalta masas paraugi

Iekļāšanas laikā katram no trim ieklātā asfalta tipiem tika noņemta viena sērija ar maisījuma paraugiem. Šiem paraugiem noteiktas tradicionālās īpašības – bitumena saturs, bitumena Fraasa temperatūra, granulometrija, porainība. Tāpat veikta testēšana, lai noteiktu maisījuma ekspluatācijas īpašības, izmantojot riteņa sliežu testu, zemes temperatūras plaisāšanas testu (TSRST) un ūdensjutības testu. Testēšanas metožu apraksti un ekspluatācijas īpašību rezultāti doti 4.1. nodaļā.



Attēls 23. Asfalta masas paraugi.

### 3.1.5. Urbumi

No ceļa tika izurbti paraugi testēšanai laboratorijā. Urbumu vietas izvēlētas balstoties uz trīs kritērijiem:

- ▽ Divi urbumi pēc nejaušības principa kvalitātes kontroles ietvaros.
- ▽ Izmantojot termālo kameru datus tika izvēlētas vietas, kurās bija redzama termālā segregācija. Tas darīts ar nolūku tiešā veidā noteikt sablīvējumu nelabvēlīgās vietās. Šie urbumi veikti ar 100 mm diametra urbi.
- ▽ Paraugi noņemti arī tajās vietās, kur tika ņemta asfalta masa, lai nodrošinātu iespēju tiešā veidā salīdzināt rezultātus. Šajās vietās veikti gan 100 mm diametra urbumi, gan arī 150 mm urbumi, kas nodrošina iespēju noteikt riteņa slīdes veidošanās pretestību un salīdzināt to ar asfalta masas testēšanas rezultātiem.

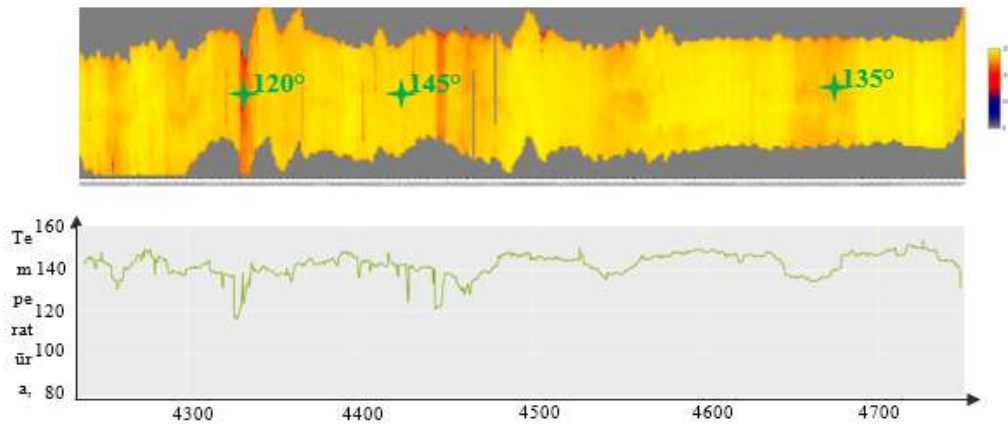
Visiem 100 mm diametra urbumiem noteikts poru saturs, bet vienam paraugam no katras ieklāšanas dienas veikts riteņa slīžu tests. Visi paraugi izmantoti, lai kalibrētu grunts penetrācijas radara rezultātus.

## 3.2. Termogrāfijas testu rezultāti

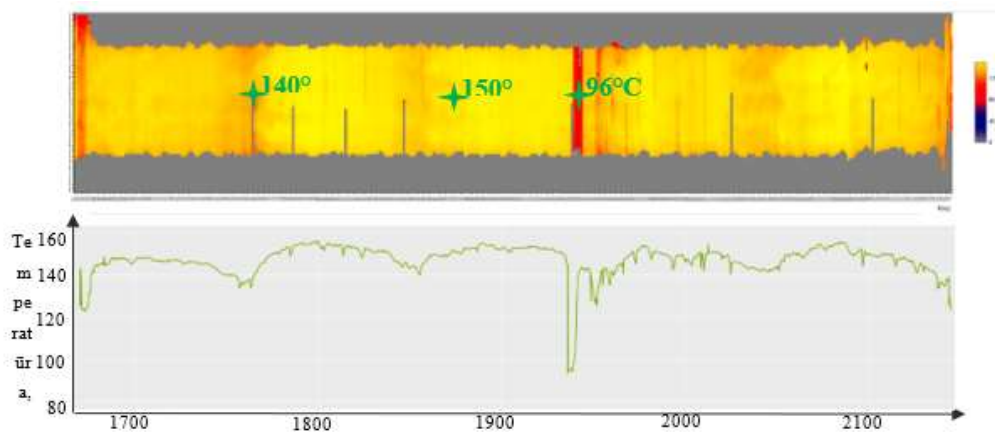
Termogrāfijas testu vizualizācijas dažādajiem maisījumu veidiem ilustrētas 24., 25. un 26. Attēlā. Redzams, ka karstā asfalta posmos vidējā temperatūra ir ap 150°C, bet siltā asfalta posmā ap 130°C. Tātad mērķis – samazināt ražošanas un ieklāšanas temperatūru par 20°C – ir sasniegts.

Vizualizācijās labi redzami posmi, kuros tiek izstrādāts katras kravas mašīnas atvestais asfalts. Tas īpaši labi redzams 26. Attēlā, jo šajā posmā netika izmantota antisegregācijas iekārta. Var novērot, ka atšķirība starp vidējo klājuma temperatūru un aukstākajiem punktiem HMA-R160 (A) un HMA-R160 (B) posmos ir ap 10°C. Šajos posmos tika izmantota antisegregācijas iekārta. Savukārt WMA-R160 un WMA-R140 posmos tā netika izmantota, un šajos posmos atšķirība ir ap 15°C. Tātad redzams, ka antisegregācijas iekārtas lietošana dod pozitīvu efektu. Tomēr jānorāda, ka lai arī šī atšķirība ir lielāka nekā

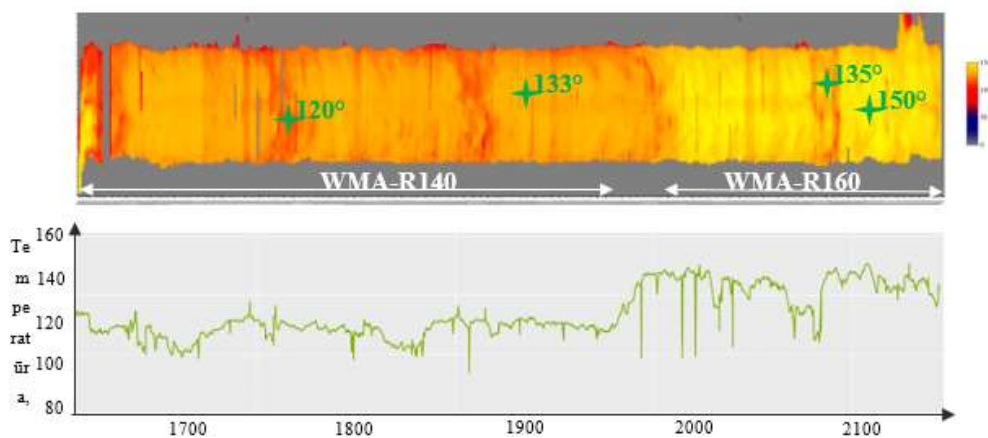
HMA-R160 (A) un HMA-R160 (B) posmos, to var uzskatīt par pieņemamu arī WMA posmos. Tas skaidrojams ar faktu, ka ieklāšanā tika izmatotas kravas mašīnas ar termoizolācijas kravas kastēm.



Attēls 24. HMA-R160 (A)



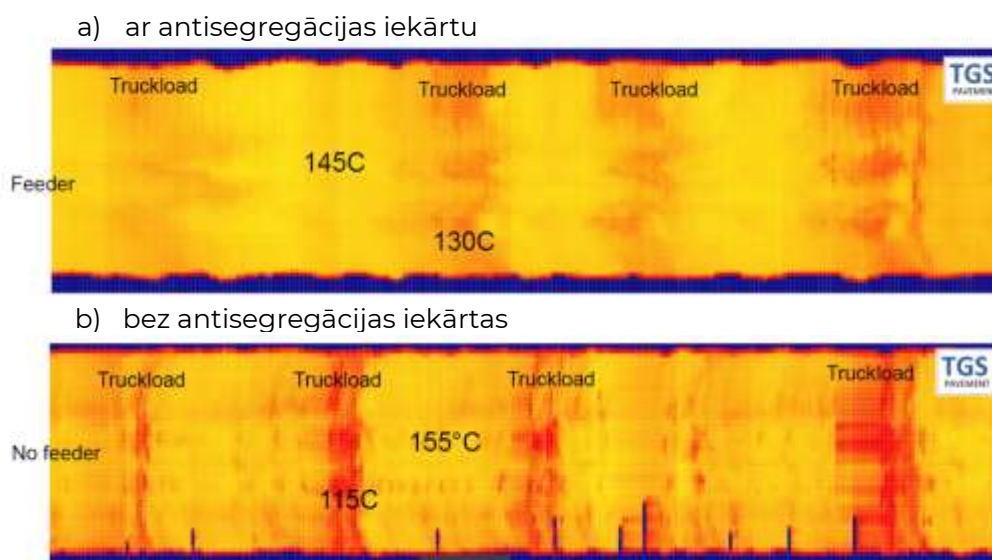
Attēls 25. HMA-R160(B).



Attēls 26. WMA-R160 un WMA-R140 posmi.

Lai dotu iespēju salīdzināt rezultātus ar būvobjektu, kurā netika izmantotas automašīnas ar termoizolācijas kravas kastēm, apskatīsim 27. Attēlu. Šis attēls iegūts ar konkrēto pētījumu nesaistītā būvobjektā, bet ar to pašu TGS iekārtu. Gadījumā a) tika izmantota antisegregācijas iekārta, bet gadījumā b) tā netika izmantota. Redzams, ka izmantojot antisegregācijas iekārtu, temperatūru atšķirības ir ap 15°C jeb aptuveni tikpat, cik mūsu pētījuma objektā gadījumā bez šīs iekārtas. Savukārt bez antisegregācijas iekārtas un bez termoizolētām kravas kastēm temperatūras atšķirība sasniedz pat 40°C.

Protams, jāņem vērā, ka ne visi apkārtējās vides parametri šajos būvobjektos ir līdzvērtīgi, bet tomēr nenoliedzami, ka termoizolētu kravas kastu izmantošana dod ievērojamu rezultātu.



Attēls 27. Termogrāfijas vizualizācija posmā, kurā netika izmantotas automašīnas ar termoizolācijas kravas kasti [33].

Attēls 28 uzskatāmi redzams, kādas sekas izraisa temperatūras segregācija. Šis ceļa posms nav saistīts ar pētījuma posmu, un tam ir tikai ilustratīva nozīme. Redzams, ka posmos izveidojušās garenvirziena plaisas. *Willoughby* et al. pētījums demonstrē, ka termālā segregācija var radīt problēmas ar seguma sablīvēšanu ja atšķirības temperatūrā ir lielākas par 14°C [34].



Attēls 28. Temperatūras segregācijas radītu bojājumu piemērs.

### 3.2.1. Riska zonas aprēķins

Igaunijā ir izveidota bonus-malus sistēma termālās segregācijas novērtēšanai būvobjektā. Būvniekam ir tiesības izmantot termogrāfu, lai pierādītu, ka termālā segregācija ir maza un par to saņemtu bonusa maksājumu. Posms tiek novērtēts kā riska zona, ja tajā temperatūra ir par vairāk nekā 10% zemāka nekā vidējā temperatūra iepriekšējos 100 metros.

Piemēram, gadījumā, kad vidējā seguma temperatūra ir 150°C, par riska zonu tiktu uzskatīts laukums, kurā temperatūra ir zemāka par 135°C. Siltā asfalta gadījumā, kad vidējā temperatūra ir ap 130°C, riska zona sāktos pie 117°C temperatūras.

Lai saņemtu bonusa maksājumu, maksimālā riska zona nedrīkst pārsniegt 5%. Bonusa aprēķinam tiek izmantota šāda formula.

$$B = 0,06 \times \left(1 - \frac{R}{20}\right) \times H \times F$$

Vienādojums 1

Mērījumu nosacījumi ir sekojoši:

- ▽ Posma garums: vismaz 1000 m.
- ▽ Apstāšanās kritērijs: >2 minūtēm.
- ▽ Mērījumu intervāls: vismaz 1 mērījums katrā metrā.
- ▽ Limiti: mērījumi, kas nav saistīti ar virsmas temperatūru tiek dzēsti (piemēram, cilvēki, iekārtas). Šādi traucējumi nedrīkst pārsniegt 5%.

Riska zonas aprēķins katram no ieklātajiem posmiem redzams 6. Tabulā. Šajā tabulā ir norādīts arī apstāšanās reižu skaits un ilgums. Tomēr jāatgādina, ka riska zonas

aprēķinam tiek izmantoti tikai temperatūras rādījumi laikā, kad iekļājējs kustas vienmērīgi. Posmi, kuros apstāšanās ir bijusi ilgāka par 2 minūtēm, aprēķinā netiek ņemti vērā<sup>1</sup>.

Redzams, ka riska zona HMA-R160 (A) un HMA-R160 (B) posmos ir ap 1,0%, bet WMA-R160 un WMA-R140 posmos tā ir 2,5% līdz 3,0% robežās. Salīdzinoši lielāks riska zonas laukums WMA-R160 un WMA-R140 posmos skaidrojams ar to, ka šajā dienā netika izmantota antisegregācijas iekārta. Tomēr arī bez antisegregācijas iekārtas riska zona ir salīdzinoši neliela, un tā nepārsniedz Igaunijā rekomendētos 5%. Tātad visi apskatītie posmi Igaunijā tiktu uzskatīti par labi izbūvētiem, un tie saņemtu bonusa maksājumu.

Jāņem arī vērā, ka pētījuma posma garums ir mazāks nekā minimāli noteiktie 1000 m, tāpēc tipiskā gadījumā to nevarētu izmantot bonusa aprēķinam. Īsiem posmiem dažādu papildu faktoru ietekme var būt lielāka nekā vismaz 1000 m gariem posmiem. Var sagaidīt, ka palielinot posma garumu, arī riska zonas lielums samazinātos visos apskatītajos gadījumos.

Tabula 6. Termogrāfijas mērījumu riska zonas aprēķins.

Posms	Garums, m	Traucējumi	Apstāšanās reižu skaits	Apstāšanās ilgums	Riska zona
HMA-R160(A)	508,6	0,99%	2	00:11:59	<b>0,87%</b>
HMA-R160(B)	474,4	3,70%	2	00:16:52	<b>1,04%</b>
WMA-R160	148,2	1,18%	1	00:02:23	<b>3,05%</b>
WMA-R140	332,6	4,03%	2	00:28:33	<b>2,42%</b>

### 3.3. Sablīvējums

Eksperimentālajam posmam izvirzītā hipotēze ir šāda: **siltā asfalta piedevu pielietošana var samazināt slihta sablīvējuma risku termālās segregācijas zonās.**

Pati siltā asfalta piedevas pielietošana, protams, termālo segregāciju nesamazina. Termālā segregācija ir atkarīga no iestrādes tehnoloģijas. Siltā asfalta piedevu priekšrocība ir tajā, ka tās uzlabo sablīvēšanu arī pie zemas temperatūras. Tātad arī pie neviendabīgas seguma temperatūras siltā asfalta piedevas potenciāli var samazināt nepietiekama sablīvējuma risku zemas temperatūras (riskā) zonās.

<sup>1</sup> Igaunijā šobrīd izstrādāta jauna formula bonusa aprēķinam, un tajā tiks ņemts vērā arī apstāšanās reižu skaits. Formula tiks piemērota no 2021. gada.

Saprotams, ka pie zemas termālās segregācijas šādu izvērtējumu nebūtu iespējams veikt. Ja visur temperatūra būtu viendabīga, arī HMA asfalta sablīvējums pat bez siltā asfalta piedevām būtu viendabīgs. Lai pētījuma rezultāti būtu daudznozīmīgi, bija nepieciešams palielināt termālo segregāciju. Tas tika darīts, atsakoties no antisegregācijas iekārtas lietošanas. Kā redzams 6. Tabulā un Attēlos 24 līdz 26, tas ir devis rezultātu un termālā segregācija ir nedaudz palielinājusies. Kā iepriekš minēts, kopumā tā joprojām ir salīdzinoši zema, un būvnieks par šāda būvobjekta nodošanu Igaunijā pat saņēmtu bonusu. Saprotams, ka speciāli veidot lielu termālo segregāciju būtu neprāts, jo šis ir valsts nozīmes autoceļš, un tam jāizpilda noteiktās kvalitātes prasības.

Tomēr, tāpat kā vairumā būvobjektu, arī šajā atsevišķās vietās bija novērojama termālā segregācija. To bija iespējams tiešā laikā novērtēt, izmantojot tiešsaistes termogrāfijas datu vizualizāciju. Vietās, kur tika novērota liela termālā segregācija, tika veikti mērījumi ar PQI operatīvo sablīvējuma noteikšanas iekārtu. Tāpat šajās vietās tika veikti urbumi un īpaši rūpīgi tika izvērtēti ar grunts penetrācijas radaru iegūtie mērījumi. Šie posmi bija lokāla parādība, parasti pat nerasniedzot joslas platumu, tāpēc normālā gadījumā tie netiktu ņemti vērā kvalitātes kontroles novērtējumā. Tie nav reprezentatīvi izbūvētajam būvobjektam. Tomēr pētījuma hipotēzes izvērtēšanai tie bija ļoti svarīgi, tāpēc tiem šajā pētījumā pievērsta liela uzmanība.

### 3.3.1. Operatīvā sablīvējuma mērījumi

Ar PQI operatīvā sablīvējuma noteikšanas iekārtu tika veikti mērījumi 9 punktos. Punkti tika atlasīti, lai katram no maisījuma tipiem noteiktu sablīvējumu gan tipiskā vietā bez termālās segregācijas, gan arī termālās segregācijas zonā. Lai to izdarītu, tika izmantoti termogrāfijas sistēmas tekošie rādījumi un reģistrēta precīza vieta izmantojot GPS koordinātes un lokālo atskaites sistēmu.

Mērījumi veikti uzreiz pēc asfalta klājēja un cik vien bieži iespējams starp veltņu pārbraucieniem. Grafikos izmantoti šādi apzīmējumi veltņu pārbraucieniem:

K – kombinētais veltnis

P – pneimatiskais veltnis

0-9 – veltņa pārbraucienu skaits

F – pēdējais PQI mērījums pēc tam, kad veltņošana pabeigta

R – grunts penetrācijas radara mērījuma rezultāts.

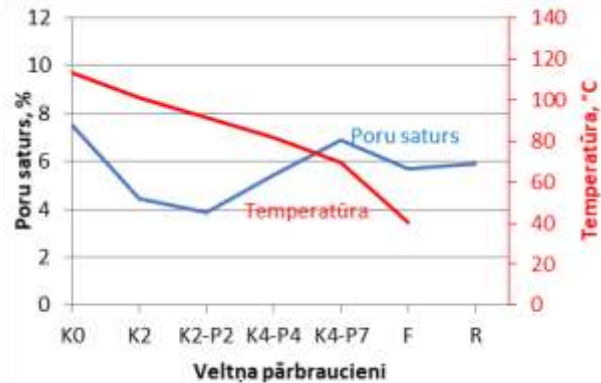
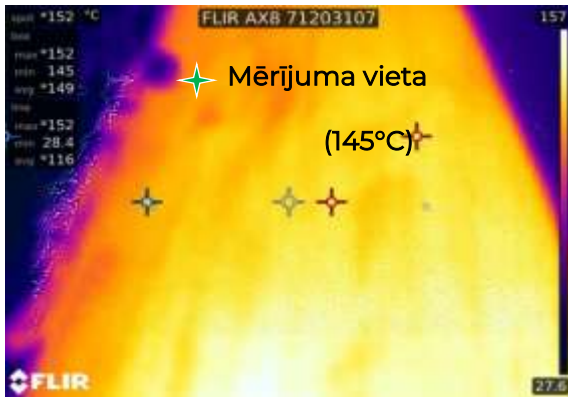
Piemēram, K4-P7 nozīmē, ka mērījums veikts pēc četriem kombinētā veltņa pārbraucieniem un 7 pneimatiskā veltņa pārbraucieniem.



Testēšanas rezultāti apkopoti Attēlos 29 līdz 37. Katra attēla kreisajā pusē redzams termogrāfijas attēls, kurā atzīmēta mērījuma vieta un šajā vietā ar infrasarkanā kameru reģistrēta temperatūra. Savukārt labajā pusē dots grafiks ar PQI operatīvā sablīvējuma mērījuma rezultātiem un šīs pašas iekārtas reģistrēto temperatūru.

### 1. Mērījums 1: HMA-R160(A) tipiska vieta

Pikets: 45+00

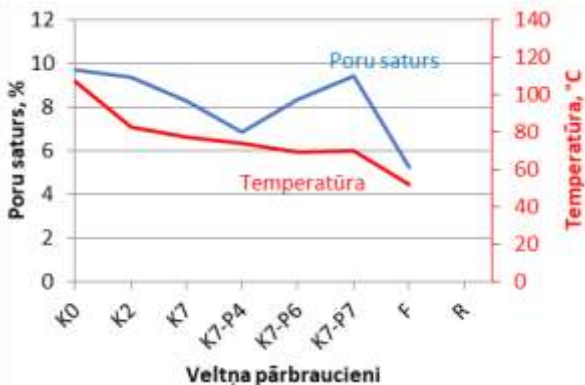
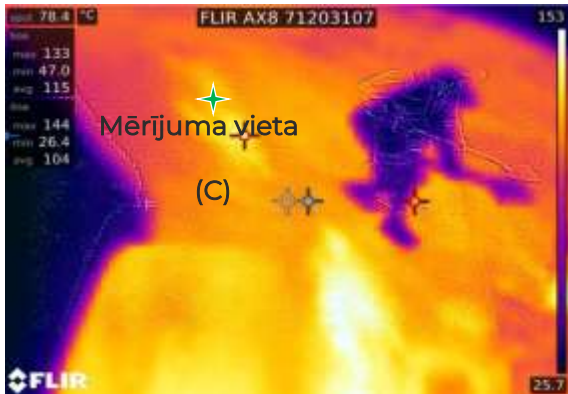


Attēls 29. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 45+00.

### 2. Mērījums 2: HMA-R160(A) termālā segregācija krustojumā

Pikets: 16+71 krustojums

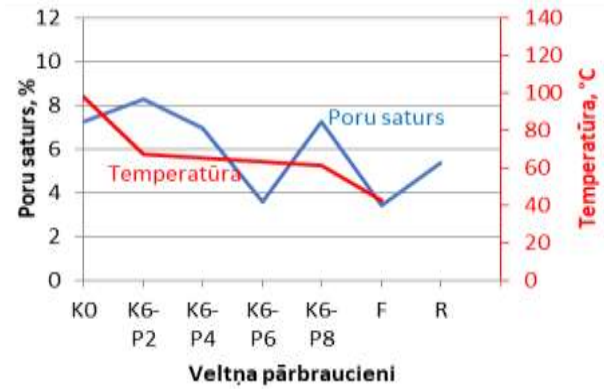
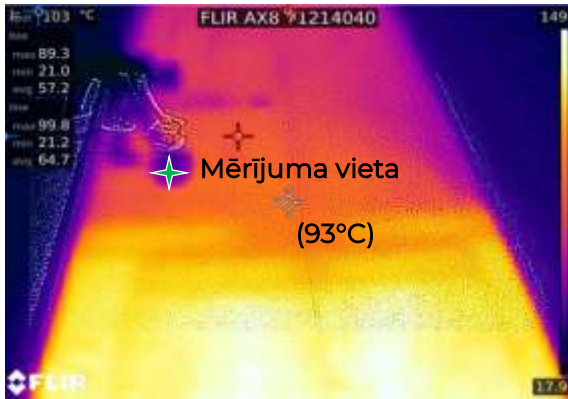
Šajā grafikā grunts penetrācijas radara mērījuma rezultāts nav norādīts, jo tas veikts krustojuma rādiusā, kur radars pāri nebrauca.



Attēls 30. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 61+71.

3. Mērījums 3: HMA-R160(B) termālā segregācija gaidot asfaltu

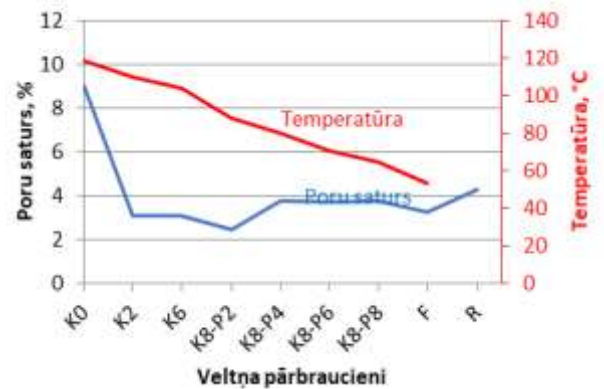
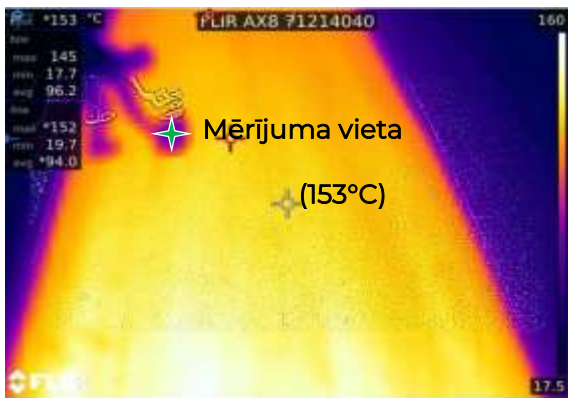
Pikets: 19+39



Attēls 31. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 19+39.

4. Mērījums 4: HMA-R160(B) tipiska vieta

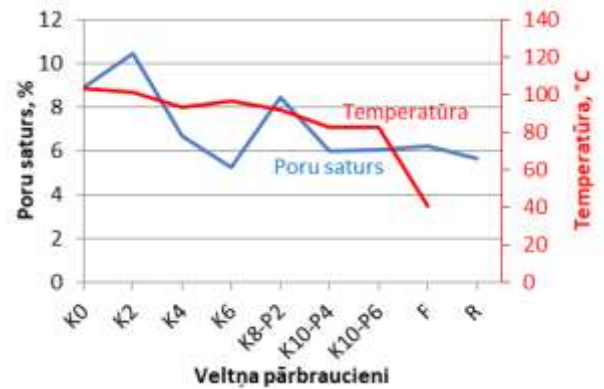
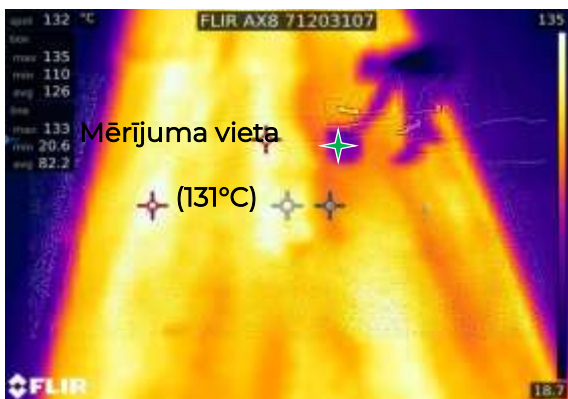
Pikets: 21+00



Attēls 32. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 21+00.

5. Mērījums 5: WMA-R160 termālā segregācija

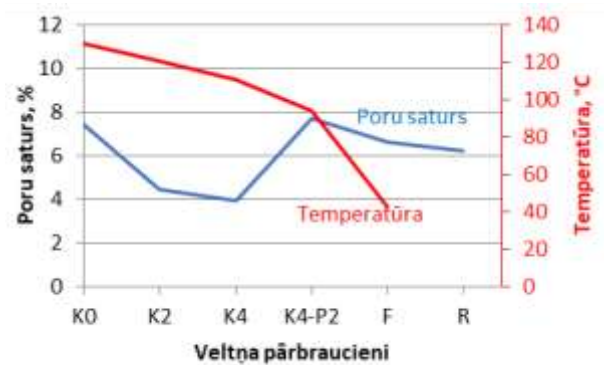
Pikets: 20+85



Attēls 33. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 20+85.

6. Mērījums 6: WMA-R160 tipiska vieta

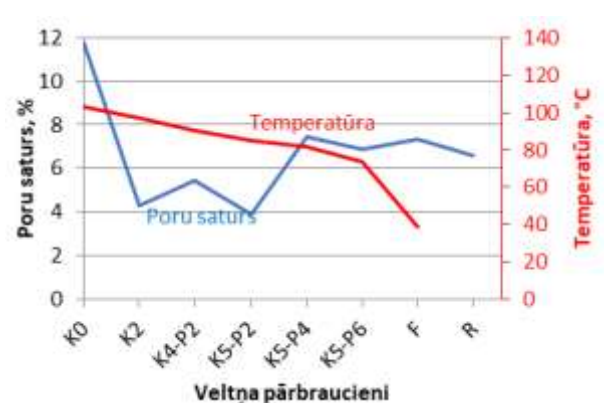
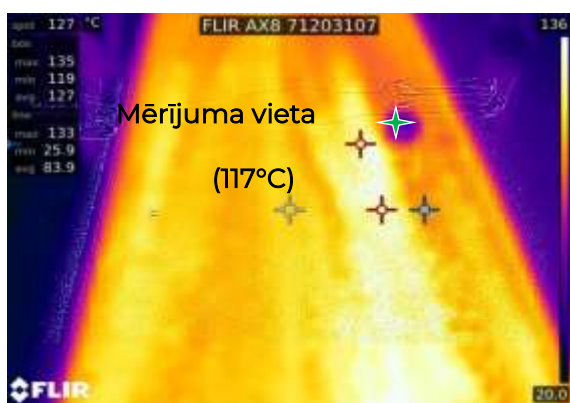
Pikets: 19+96



Attēls 34. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 19+96.

7. Mērījums 7: WMA-R160 termālā segregācija

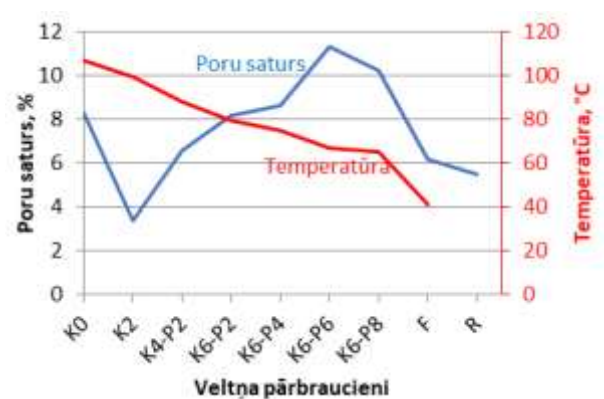
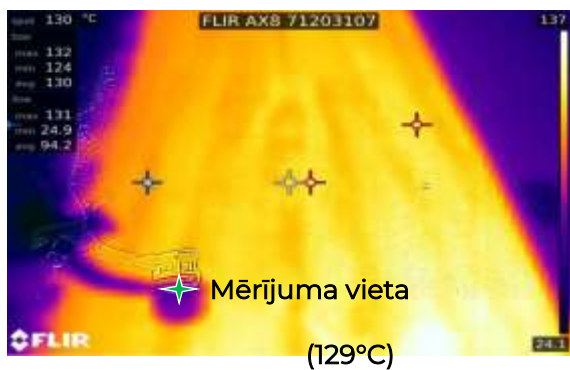
Pikets: 18+78



Attēls 35. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 18+78.

8. Mērījums 8: WMA-R140 tipiska vieta

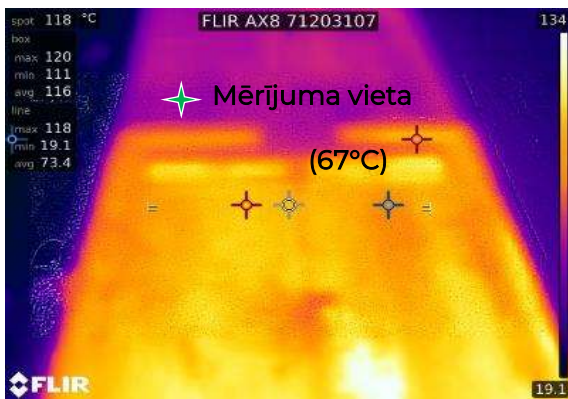
Pikets: 17+22



Attēls 36. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 17+22.

## 9. Mērījums 9: WMA-R140 termālā segregācija

Pikets: 16+57



Attēls 37. Operatīvā sablīvējuma mērījumu rezultāti piketā 16+57.

Izpētot attēlus var izdarīt vairākus secinājumus:

1. Ar PQI iekārtu noteiktais poru saturs veltņa pārbraucieniem ir ļoti svārstīgs. Nav redzama sagaidāmā tendence, ka pēc katra pārbrauciena poru saturs samazinātos. Tam kā iemesls varētu būt veltņu atstātais mitrums, kas izmaina mērījuma rezultātus. Tāpat iespējams, ka pēc veltņu pārbraucieniem asfalta virsma vēl nav pietiekami līdzena un izveidojas gaisa kabatas starp iekārtu un ceļa virsmu. Nevar izslēgt arī iekārtas defektu vai nespēju reģistrēt šādas nelielas izmaiņas. Jebkurā gadījumā redzams, ka šādam mērķim iekārtas izmantošana ir apšaubāma.
2. Pēdējais PQI mērījums katrā punktā tika veikts jau kādu laiku pēc sablīvēšanas pabeigšanas. Grafikos tas atzīmēts ar burtu „F”. Salīdzinot šo „F” punktu rezultātus ar grunts penetrācijas radara rezultātiem („R” punkts), redzams, ka katrā no grafikiem tie ir salīdzinoši tuvu. Grafikos redzams, ka temperatūra „F” mērījuma laikā pārsvarā bija ap 40°C un seguma virsma bija sausa. Tas norāda, ka PQI mērījuma rezultāti ir salīdzinoši uzticami, ja tie veikti neilgi pēc sablīvēšanas noslēgšanas uz sausas virsmas un pie samazinātas seguma temperatūras.
3. Redzams, ka temperatūra, kas katra mērījuma vietā iegūta ar PQI iekārtu, gandrīz visos gadījumos ir ievērojami zemāka nekā ar infrasarkanu kameru iegūtā temperatūra. Iespējams, tas skaidrojams ar faktu, ka pašas iekārtas termālā masa ir salīdzinoši liela un mērījuma vietā tā atdzesē segumu. Tāpat iespējams, ka termometram nepieciešama kalibrācija. Jebkurā gadījumā var pieņemt, ka ar termālo kameru iegūtie rezultāti ir uzticamāki, jo iekārta regulāri kalibrēta un izmantota atbilstības novērtēšanā Igaunijā.

### 3.3.2. Grunts penetrācijas radara testu rezultāti

Attēlā 39 redzami grunts penetrācijas radara mērījumu rezultāti WMA-R140 un WMA-R160 posmiem, bet 38. Attēlā – HMA-R160 (B) posmam. Radara mērījumu rezultāti tika kalibrēti, izmantojot konkrētajā vietā iegūtos urbumu rezultātus. Katra urbuma poru saturs un urbšanas vieta norādīta attēlos. Visbeidzot, katrā attēlā redzama arī ar termogrāfu noteiktā temperatūra. Norādītā temperatūra konkrētajā šķērsgriezumā ir vidējā no metru platas labās rīses joslas. Šī pati josla tika izmantota, veicot mērījumu ar grunts penetrācijas radaru, tāpēc to var izmantot, lai tiešā veidā salīdzinātu temperatūras ietekmi uz gala sablīvējumu.

39. Attēlā norādīts, kurā vietā tika ieklāts karstais asfalts ar *Evotherm* piedevu un kurā siltais asfalts. Temperatūras izmaiņas labi redzamas arī grafikā.

Redzams, ka WMA-R140 un WMA-R160 posmos porainība ir par aptuveni procentu augstāka nekā HMA-R160 (B) posmā. Tas visdrīzāk nav saistīts ar *Evotherm* piedevas pielietošanu. Jāatgādina, ka šie posmi tika ieklāti divās dažādās dienās un šāda atšķirība visdrīzāk skaidrojama ar atšķirīgo sablīvēšanas metodiku un dažādajiem laikapstākļiem šajās divās dienās. Kā redzams Attēlos 29 līdz 37, tad kombinēto veltņa pārbraucienu skaits HMA posmos vidēji ir lielāks nekā posmos, kuros tika izmantota *Evotherm* piedeva. Arī vēja ātrums otrajā dienā bija lielāks.

WMA-R160 posms tika paredzēts, kā kontroles posms, kura funkcija ir nodrošināt, ka tiek salīdzinātas līdzvērtīgi lielumi. Redzams, ka arī šajā posmā sablīvējums ir zemāks nekā HMA-R160(B) posmā. No materiāla īpašību viedokļa tam nav pamata. *Evotherm* piedeva tomēr ir zināma kā sablīvēšanas uzlabošanas piedeva. Tas novērots arī šī pētījuma laboratorijas testēšanas sadaļā, kur pielietojot *Evotherm*, tika panākts augstāks sablīvējums pie tās pašas sablīvēšanas enerģijas (skatīt 4.2. nodaļu).

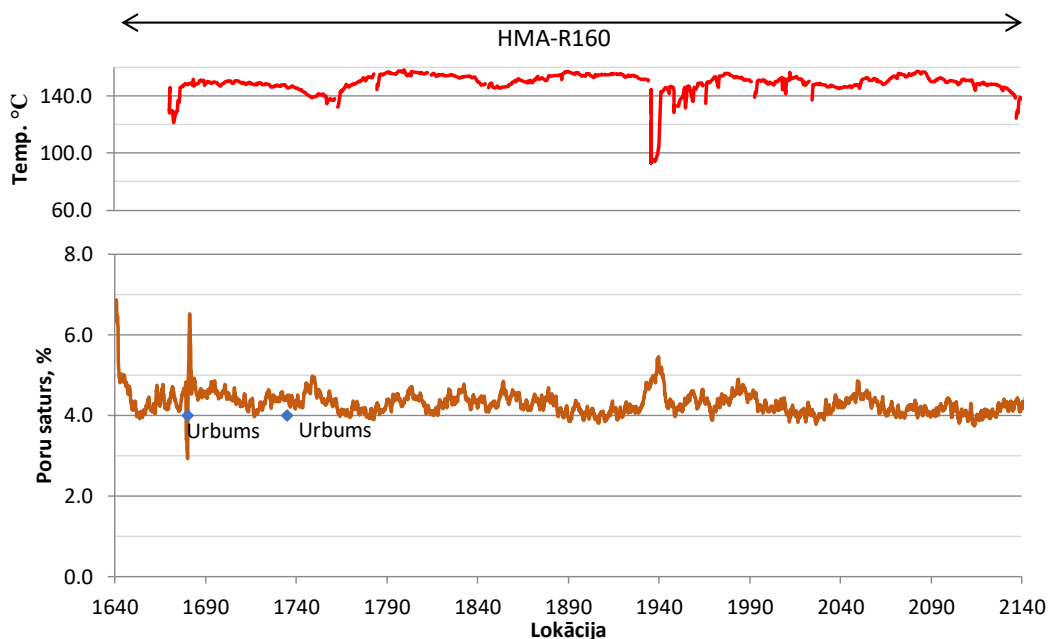
Šo iemeslu dēļ nav pamata uzskatīt, ka piedeva varētu pasliktināt sablīvējumu un visdrīzāk relatīvi zemāks sablīvējums nekā HMA-R160 (B) posmā saistīts ar ārējiem faktoriem – vēja ātrumu un sablīvēšanas metodoloģiju.

Tā kā tiešā veidā sablīvējumu dažādajās dienās salīdzināt nevar, tad atliek novērtēt relatīvo sablīvējumu katrā no dienām. Redzams, ka poru saturs ir tiešā veidā atkarīgs no temperatūras. Jāatgādina, ka temperatūra fiksēta 4 m aiz ieklājēja pirms pirmā veltņa pārbraukšanas. Protams, ka ar veltņošanu iespējams nelielas temperatūras svārstības kompensēt. Tomēr grafikos redzams, ka vietās, kur novērojamas lielākas temperatūras atšķirības, arī sablīvējums ir svārstīgs. Šīs vietas saistītas ar ieklājēja apstāšanos uz ilgāku laika posmu.

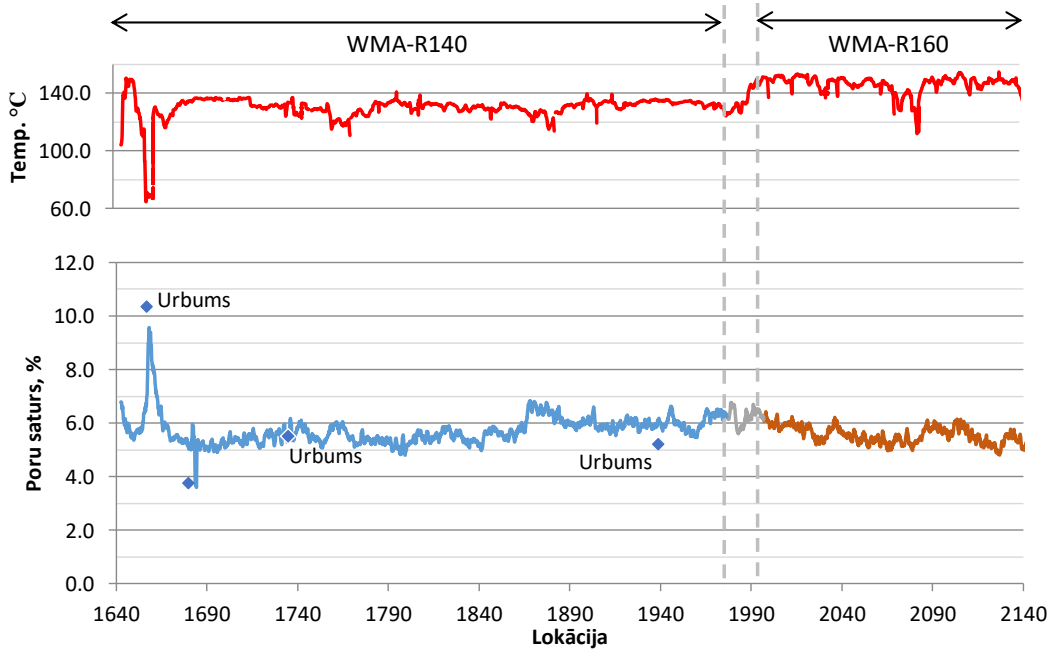
Svarīgs novērojums ir tas, ka poru saturs WMA-R140 posmā ir līdzvērtīgs WMA-R160 posmam arī neskatoties uz to, ka temperatūra ir par aptuveni 20°C zemāka. Tas norāda uz piedevas veiksmīgu darbību.

Visbeidzot var novērot, ka poru saturs otrajā dienā (WMA-R140 un WMA-R160 posmi) ir nedaudz vairāk svārstīgs, salīdzinot ar pirmo dienu (HMA-R160 (B) posms). Pirmajā dienā standartnovirze ir 0,24%, bet otrajā 0,39%. Standartnovirzes aprēķinātas, atskaitot jau minētos atsevišķos posmus, kuros ir izteikti lielas, ar tipisku ieklāšanas procesu nesaistītas temperatūras svārstības. Pirmajā dienās tas ir ap 1680 un 1940 piketu, bet otrajā dienā ap 1650 piketu.

Poru satura lielāka svārstība visdrīzāk skaidrojama ar to, ka otrajā dienā netika izmantota antisegregācijas iekārta un tāpēc, kā iepriekš minēts, arī temperatūras svārstības ir nedaudz lielākas. Tas, iespējams, arī ir iemesls nedaudz lielākām sablīvējuma svārstībām. Tomēr arī jāatceras, ka šis ir tikai 1 km garš posms un tāpēc tālejošus secinājumus par antisegregācijas iekārtas lietderību izdarīt ir grūti. Abos posmus kopumā poru satura svārstības kopumā ir nelielas.



Attēls 38. HMA-R160(B) poru saturs un temperatūra.



Attēls 39. WMA-R160 un WMA-R140 poru saturs un temperatūra.

## 4. Eksploatācijas īpašību testēšanas rezultāti

Šajā nodaļā apkopoti eksploatācijas īpašību testēšanas rezultāti izmēģinājuma posmā ņemtajiem asfalta masas paraugiem, no izmēģinājuma posma izurbtajiem paraugiem un arī laboratorijā samaisītajiem paraugiem.

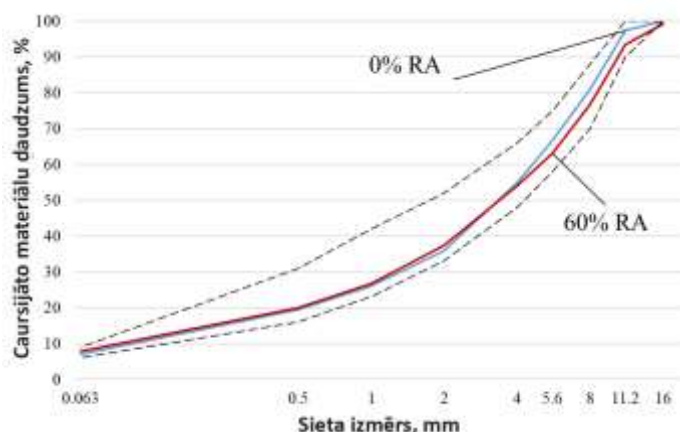
Iespējas variēt ar dažādiem parametriem eksperimentālā posma izbūvē ir limitētas gan lielo apjomu dēļ, gan tādēļ, ka nepieciešams nodrošināt kvalitāti. Tādēļ, lai papildinātu eksperimentālā posma rezultātus, veikta testēšana arī laboratorijā sagatavotiem maisījumiem. Tas ļauj izvērtēt faktoros, ko pilna apjoma ražošanā ir sarežģīti izmainīt. Tāpat laboratorijas apstākļos nepieciešams arī noteikt atbilstošākās metodes siltā asfalta kvalitātes kontrolei. Šo iemeslu dēļ laboratorijas pētījuma plānā iekļauti sekojoši mainīgie lielumi:

1. Temperatūras samazināšana par 15 °C un 30 °C.
2. Maisījuma novecināšanas nepieciešamība.
3. Sablīvēšanas metodes ietekme uz poru saturu.
4. Frēzētā asfalta pievienošana, par 60% aizvietojojot minerālmateriālus.

Maisījumi laboratorijā tika sagatavoti no tiem pašiem materiāliem un saskaņā ar to pašu *Strabag* recepti, kas izmantota izmēģinājuma posma izbūvē (redzama Attēls 15). To pašu materiālu izmantošana dod iespēju tiešā veidā salīdzināt testēšanas rezultātus paraugiem, kas iegūti sagatavojot maisījumu laboratorijā, maisot rūpnīcā un no urbumiem.

Papildus izgatavoti arī maisījumi ar 60% frēzēto asfaltu (RA) to sastāvā. Šiem maisījumiem netika veiktas nekādas citas izmaiņas receptē (piemēram, netika pievienotas atjaunojošās piedevas). Tas darīts ar nolūku, lai demonstrētu tieši RA ietekmi. 40. Attēlā redzama maisījuma granulometrija. Atšķirība ar oriģinālo recepti ir salīdzinoši neliela un var pieņemt, ka granulometrijas atšķirības neatstāj lielu ietekmi uz maisījumu eksploatācijas īpašībām. Kopējais bitumena saturs šim maisījumam izvēlēts līdzvērtīgs oriģinālajai receptei (5.5%). RA bitumena penetrācija – 39 dmm un RA bitumena saturs – 4.35%.





Attēls 40. Laboratorijā sagatavotu maisījumu granulometrija.

Tabulā 7 ir apkopoti visi mainīgie, kas izmantoti pētījumā, kā arī norādīts apzīmējums katram paraugam. Šie apzīmējumi tiks izmantoti, ziņojot rezultātus.

Tabula 7. Maisījumu apzīmējumi.

Apzīmējums	Asfalta tips	Maisīšanas metode	Paraugu sablīvēšana	Maisīšanas temperatūra	Novecināšana
HMA-140	Karstais asfalts	Laboratorija	Laboratorija	140°C	Nav
WMA-140	Siltais asfalts	Laboratorija	Laboratorija	140°C	Nav
WMA-125	Siltais asfalts	Laboratorija	Laboratorija	125°C	Nav
WMA-110	Siltais asfalts	Laboratorija	Laboratorija	110°C	Nav
RWMA-125	Siltais asfalts +60% RA	Laboratorija	Laboratorija	125°C	Nav
RWMA-125a	Siltais asfalts +60% RA	Laboratorija	Laboratorija	125°C	Nav
HMA-140a	Karstais asfalts	Laboratorija	Laboratorija	140°C	4h pie 140°C
WMA-125a	Siltais asfalts	Laboratorija	Laboratorija	125°C	4h pie 125°C
HMA-R160	Karstais asfalts	Rūpnīca	Laboratorija	160°C	Nav
WMA-R160	Siltais asfalts	Rūpnīca	Laboratorija	160°C	Nav
WMA-R140	Siltais asfalts	Rūpnīca	Laboratorija	140°C	Nav
HMA-U160	Karstais asfalts	Rūpnīca	Uz ceļa (urbumi)	160°C	Nav
WMA-U140	Siltais asfalts	Rūpnīca	Uz ceļa (urbumi)	140°C	Nav

## 4.1. Testēšanas metodes

### 4.1.1. Granulometrija

Bitumena saistvielas ekstrakcija veikta saskaņā ar LVS EN 12697-1 un minerālmateriālu granulometrija noteikta saskaņā ar LVS EN 12697-2.

Sablīvēšana un paraugu izgatavošana laboratorijā

Laboratorijā sablīvētie paraugi izgatavoti ar veltņa blīvētāju saskaņā ar LVS EN 12697-33 vai ar Māršala āmuru saskaņā ar LVS EN 12697-30 (2×50 sitieni pie attiecīgās temperatūras). Paraugu novecināšana veikta, tos ievietojot krāsnī uz četrām stundām pie nepieciešamās temperatūras saskaņā ar LVS EN12697-52 procedūru A1.

### 4.1.2. Vienass stiepes tests (TSRST).

Vienass stiepes tests izpildīts saskaņā ar LVS EN 12697-46. TSRST testā prizmveida paraugs tiek pielīmēts pie divām horizontālām alumīnija plāksnēm tā, lai nodrošinātu tā augstumu nemainīgu. Pakāpeniski ar ātrumu -10K/h tiek samazināta parauga temperatūra, kas izsauc stiepes spēkus. Tiek noteikta temperatūra, pie kuras paraugs sāk plaisāt.

Paraugi tiek izgatavoti, zāģējot un frēzējot paraugu, kas izgatavots ar veltņa blīvētāju līdz nepieciešamajiem izmēriem (160 mm×50 mm×50 mm). Katram materiāla tipam tika izgatavoti un testēti vismaz divi paraugi. Ja paraugu rezultāti neiekļāvās standartā pieļautajās robežās, tika izgatavots jauns paraugs, un šeit publicētais rezultāts iekļauj tikai paraugus, kuru izkliede bija standartā noteiktajās robežās.

### 4.1.3. Riteņa sliedes tests

Riteņa sliedes veidošanās ātrums tiek noteikts saskaņā ar LVS EN 12697-22. Testēšana tiek veikta 6 cm bieziem prizmveida asfalta paraugiem, kas izgatavoti ar veltņa blīvētāju vai izurbti no ceļa klātnes. Paraugi tiek pakļauti 700 N lielai kustīga riteņa cikliskai slodzei ar ātrumu 26.5 cikli minūtē. Testa ilgums ir 20000 cikli. Testēšana tika veikta 60°C temperatūrā. Riteņa sliedes dziļumu nosaka, izmantojot pārvietojuma indikatorus.

### 4.1.4. Ūdensjutība

Paraugu ūdensjutība netiešās stiepes testā noteikta saskaņā ar LVS EN 12697-12 pie 25°C temperatūras. Testēšanu veic, sadalot paraugus divās grupās un vienu no tām noturot ūdenī 24h, bet otru testējot sausu. Ūdensjutību aprēķina, nosakot slapjās paraugu grupas stiepes stiprības attiecību pret sauso paraugu grupu.

## 4.2. Sablīvējums

Siltā asfalta tehnoloģiju primārā funkcija ir nodrošināt pietiekamu sablīvējamību arī pie zemākas temperatūras vai nelabvēlīgos apstākļos. Saskaņā ar daudzu pētījumu rezultātiem sablīvējums ir viens no galvenajiem faktoriem, kas ietekmē ceļa seguma īpašības [35], tāpēc tam jāpievērš liela vērība.

Kā bija redzams izmēģinājumā posma rezultātu analizē, tad poru saturs siltajam asfaltam, kas sablīvēts pie par 20°C zemākas temperatūras, un karstajam asfaltam bija caurmērā līdzvērtīgi.

Lai pārbaudītu sablīvējamību laboratorijas apstākļos, paraugi tika sablīvēti pie trim dažādām temperatūrām ar divām dažādām metodēm: Māršala āmuru un veltņa blīvētāju. Sablīvēšanas enerģija visos gadījumos bija konstanta. Pie konstantas sablīvēšanas enerģijas gaispildīto poru saturs norāda uz materiāla iestrādājamību, tāpēc to var lietot WMA un HMA salīdzināšanā.

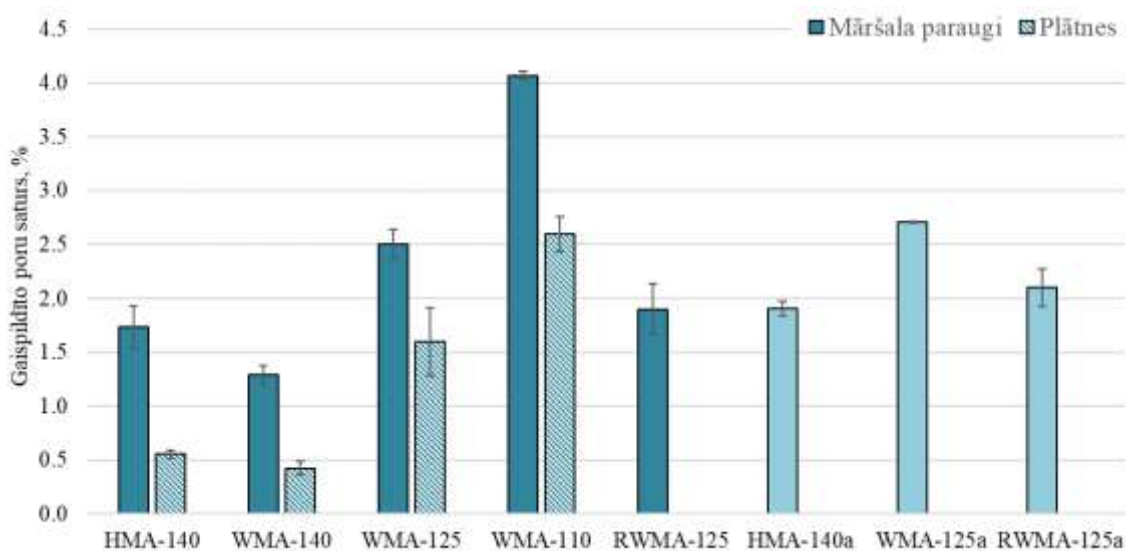
HMA paraugu sablīvēšanai izvēlēta 140°C temperatūra saskaņā ar standartā norādīto attiecīgajam maisījuma tipam. Lai simulētu atšķirības temperatūrā, kādas tika pielietotas eksperimentālajā posmā, siltais asfalts tika sablīvēts pie par 15°C un par 30°C zemākas temperatūras nekā karstais asfalts (attiecīgi pie 125°C un 110°C).

Tabulā 8 ir apkopoti visi tilpuma īpašību testēšanas rezultāti laboratorijā maisītajiem paraugiem.

Tabula 8. Tilpuma īpašību testēšanas rezultāti laboratorijā maisītiem paraugiem.

Maisījums	Maks. Blīvums, kg/m <sup>3</sup>	Gaisa poras, %	VMA, %	VFB, %
HMA-140	2487	1.7	15.0	88.4
WMA-140	2493	1.3	14.7	91.2
WMA-125	2501	2.5	15.8	84.1
WMA-110	2523	4.1	17.2	76.4
RWMA-125	2518	2.0	15.4	87.7
HMA-140a	2496	1.9	15.2	87.5
WMA-125a	2494	2.7	15.9	83.0
RWMA-125a	2307	2.1	15.5	86.5

Attēlā 41 vieglākai vizuālai uztverei ilustrēts gaispildīto poru daudzums. Redzams, ka WMA piedevas pielietošana pie konstantas temperatūras nodrošina augstāku sablīvējumu, salīdzinājumā ar karsto asfaltu. Sablīvēšanas temperatūras pazemināšana savukārt palielina gaispildīto poru saturu. Redzams, ka poru saturs WMA ir lielāks nekā HMA, samazinot temperatūru gan par 15°C, gan 30°C. Tomēr pie 15°C samazinājuma poru saturs joprojām ir Ceļu specifikācijās 2019 noteiktajās robežās Māršala paraugiem (1.5 % līdz 4.0 %). Maisījumu novecināšana nerada nozīmīgas izmaiņas sablīvējumā. Testa posmā veiktie testēšanas rezultāti attēlā nav iekļauti, jo tie padziļināti analizēti 3.3. nodaļā.



Attēls 41. WMA piedevas pievienošana uzlabo laboratorijas paraugu sablīvējamību, bet temperatūras samazināšana to pasliktina.

Saskaņā ar *Evotherm* ražotāja sniegto informāciju, piedeva darbojas līdzīgi smērvielai, kas uzlabo bitumena iestrādājamību. Zināms, ka Māršala āmurs nereproducē faktiskos sablīvēšanas apstākļus, kas sastopami uz ceļa – trieciena sablīvēšana nedod iespēju minerālmateriālu daļiņām ieņemt optimālu pozīciju bīdes spēku ietekmē. Šī iemesla dēļ papildu Māršala āmuram tika izmantots arī laboratorijas veltņa blīvētājs. Tā darbība daudz precīzāk atveido spēkus, kādi darbojas veicot sablīvēšanu būvobjektā.

41. Attēlā salīdzinot šīs divas metodes, redzams, ka veltņa sablīvētājs materiālu sablīvē līdz augstākai pakāpei nekā Māršala āmurs. Tomēr abos gadījumos tendence ir līdzīga – siltā asfalta piedevas pielietošana nekompensē temperatūras samazināšanu. Tātad laboratorijas apstākļos WMA piedeva pie zemākas sablīvēšanas temperatūras nenodrošina līdzvērtīgu sablīvējumu kā karstais asfalts pie tradicionālas temperatūras.

Lai gan šie rezultāti parāda skaidru tendenci, tie jāvērtē piesardzīgi. Gan šajā pētījumā, gan daudzos ārvalstu pētījumos, kas veikti asfalta ieklāšanas laikā, pierādīts, ka WMA piedevas būvobjektā arī pie zemākas temperatūras ļauj nodrošināt sablīvējumu, kas

ir līdzvērtīgs karstā asfalta sablīvējumam. No tā var secināt, ka, lai kura no metodēm arī tiktu izmantota laboratorijas paraugu sablīvēšanai, ir sarežģīti replicēt sablīvēšanas apstākļus, kas novērojami uz vietas būvobjektā. Līdzīgi rezultāti redzami arī ārvalstu pētījumos.

Šī iemesla dēļ optimālo sablīvēšanas temperatūru ieteicams noteikt no būvobjektā veiktiem mērījumiem. To iespējams izdarīt būvniekam pakāpeniski samazinot ražošanas temperatūru, lai nodrošinātu līdzvērtīgu sablīvējumu kā karstajam asfaltam.

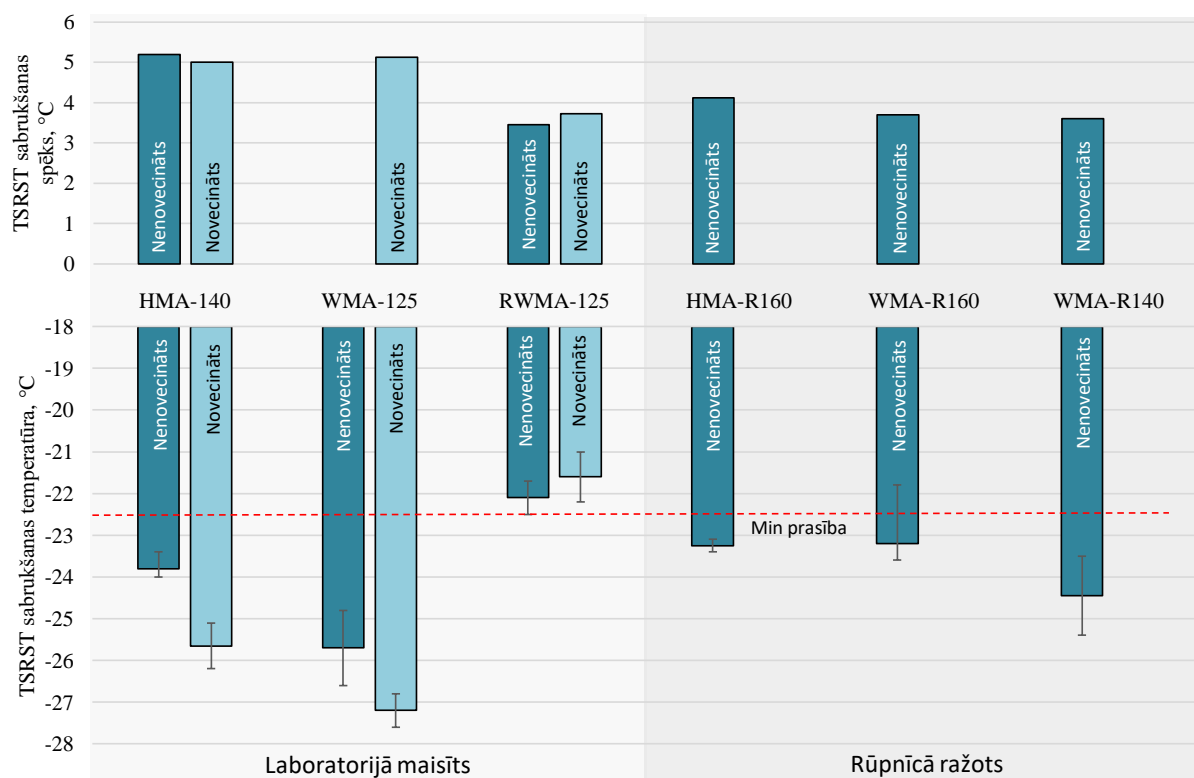
Ceļu specifikācijās ieklāšanas sablīvējuma kontrolei noteiktās prasības ir atkarīgas no paraugiem, kas sablīvēti ar Māršala āmuru. 41. Attēlā redzams, ka gaispildīto poru saturs Māršala paraugiem pie samazinātas temperatūras ir zemāks nekā karstajam asfaltam, arī tad, ja tiek izmantota WMA piedeva. Tātad poru satura prasību izvirzīšana, balstoties uz WMA paraugiem, kas sablīvēti pie faktiskās ieklāšanas temperatūras, novestu pie augstāka poru satura arī uz vietas būvobjektā. Tas var nelabvēlīgi ietekmēt ceļa ilgmūžību. Turklāt, kā iepriekš minēts, būvobjektā ar vienlīdzīgām sablīvēšanas enerģijām gan WMA, gan HMA sablīvējums būs līdzīgs (pieņemot, ka sablīvēšana veikta atbilstošā temperatūrā). Šo iemeslu dēļ ieteicams izvirzīt prasības siltā asfalta sablīvēšanai būvobjektā, veicot asfalta masas paraugu sablīvēšanu ar Māršala āmuru pie karstajam asfaltam atbilstošas temperatūras, neatkarīgi no tā, vai būvobjektā ir pielietota siltā asfalta tehnoloģija.

### 4.3. Termālā plaisāšana

TSRST testu rezultāti apkopoti 42. Attēlā. Visi maisījumi, izņemot tos, kuru sastāvā ir frēzētais asfalts, izpildījuši minimālo termālās plaisāšanas pretestību dilumkārtām (-22.5°C saskaņā ar Ceļu specifikācijām 2019). Redzams, ka gan rūpnīcā ražotiem, gan laboratorijā maisītiem paraugiem pie zemākas sagatavošanas temperatūras kritiskā plaisāšanas temperatūra ir zemāka. Tas skaidrojams ar mazāku bitumena novecošanos. Kā redzams, salīdzinot HMA-R160 un WMA-R160 maisījumus, var secināt, ka WMA piedevas pievienošana pati par sevi neizmaina TSRST rezultātus.

Salīdzinot laboratorijā maisītos paraugus ar un bez novecināšanas, novērojama negaidīta parādība. Tradicionāli tiek uzskatīts, ka bitumena novecošanās padara bitumenu trauslāku, tāpēc sabrukšanas temperatūrai vajadzētu paaugstināties, tomēr novērojams ir pretējais. Atšķirība ir 1.5°C robežās, tāpēc tā var nebūt statistiski nozīmīga. Salīdzinot maksimālo spēku pie sabrukšanas redzams, ka tas šiem paraugiem nav mainījies.

Maisījumi, kuru sastāvā ir frēzētais asfalts, kļuvuši trauslāki. Tas arī bija sagaidāms, jo šiem maisījumiem netika veiktas nekādas izmaiņas maisījuma receptē salīdzinot ar pārējiem maisījumiem. Atjaunojošo piedevu pievienošana, zemākas viskozitātes bitumena pievienošana vai bitumena satura palielināšana visdrīzāk uzlabotu rezultātu.



Attēls 42. WMA maisījumu zemas temperatūras plaisāšanas pretestība ir labāka nekā karstajam asfaltam.

#### 4.4. Riteņa sliedes veidošanās pretestība

Maisījumu riteņa sliežu testēšanas rezultāti apkopoti 43. un 44. Attēlos. Šajos attēlos ietverti gan laboratorijas maisījumu, gan rūpnīcā ražota asfalta, gan arī urbumu testēšanas rezultāti.

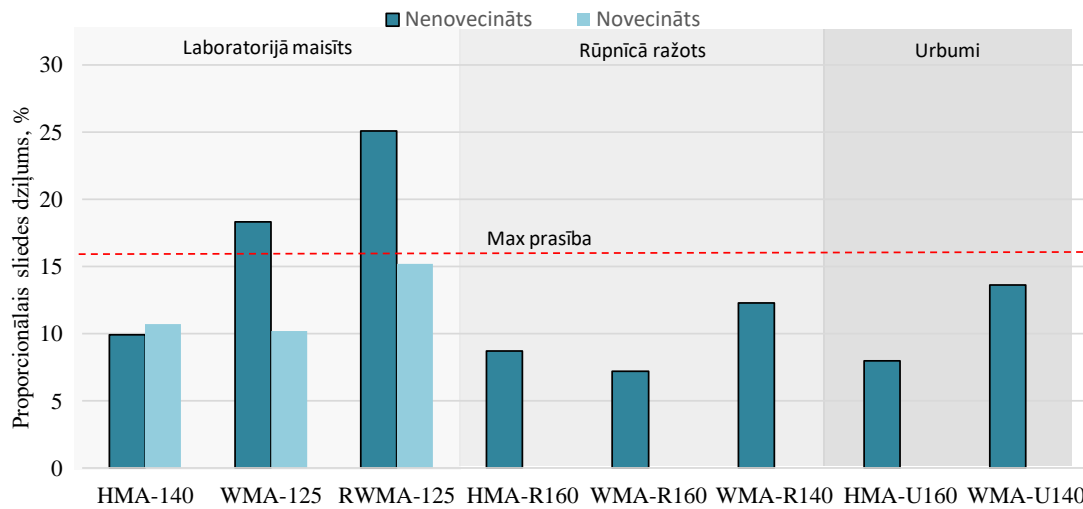
Attēlā 43 redzams, ka tikai tie laboratorijā sagatavotie maisījumi, kas tikuši novēcināti, izpilda proporcionālā sliedes dziļuma prasību – ne vairāk kā 16% iegrimi šim maisījuma tipam. Tajā pat laikā visi rūpnīcā ražotie maisījumi izpilda šo prasību. Tāpat arī no ceļa ņemto urbumu testēšanas rezultāti visiem paraugiem izpilda prasību (atgādinu, ka gan rūpnīcā, gan laboratorijā ražotie maisījumi ir izgatavoti pēc vienas receptes un ar tiem pašiem materiāliem). No tā var secināt, ka viens un tas pats maisījums, kas sagatavots dažādos veidos, var uzrādīt ļoti atšķirīgus rezultātus.

Redzams, ka vislielākais proporcionālais sliedes dziļums ir maisījumam ar frēzēto asfaltu tā sastāvā. Tipiski frēzētā asfalta sastāvā esošais novecojušais bitumens uzlabo pretestību pret risu veidošanos, bet šajā gadījumā tas nav noticis. Visdrīzāk, ka tas ir saistīts ar minerālmateriālu zemo šķautņainību.

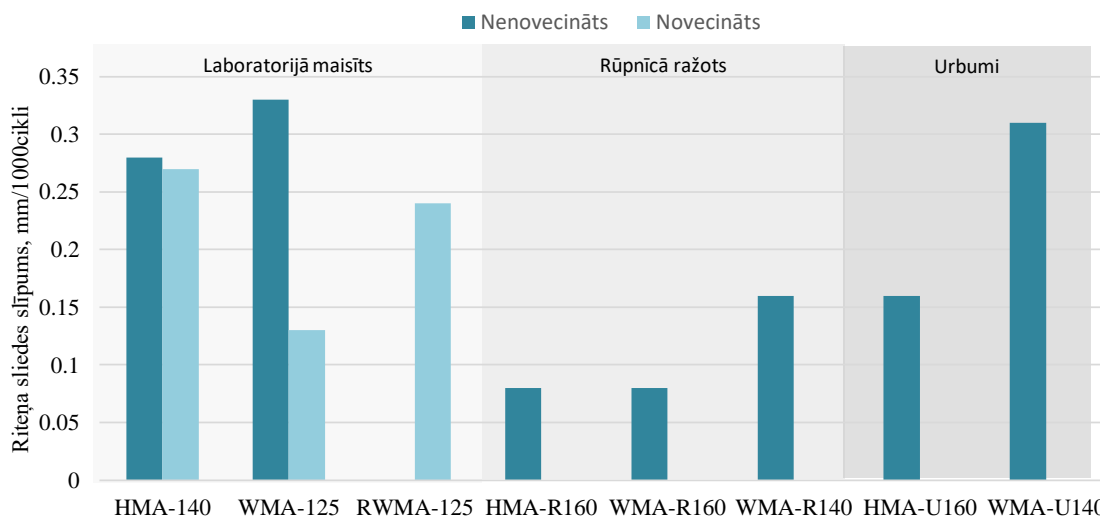
44. Attēlā redzams, ka visi maisījumi izpilda šīs receptes asfaltam nepieciešamā riteņa sliedes veidošanās slīpumu, kas ir ne vairāk kā 0,8.

Riteņa sliedes pretestība ir svarīga tieši ceļa kalpošanas sākumposmā, pirms bitumens ir sācis novecoties atmosfēras ietekmē. Tāpēc ir svarīgi reproducēt rūpnīcā sagaidāmo novecošanos arī laboratorijas apstākļos. Kā redzams gan no rūpnīcā izgatavotu maisījumu testēšanas rezultātiem, gan no izurbto paraugu testēšanas rezultātiem, tad siltā asfalta riteņa sliedes iegrieme salīdzinājumā ar karsto asfaltu ir nedaudz augstāka. Šī atšķirība skaidrojama ar samazināto novecošanos ražošanas laikā. Lai censtos šo parādību simulēt, laboratorijā izgatavotajiem maisījumiem novecināšanas temperatūra tika samazināta uz 125°C (salīdzinājumā ar 140°C karstajam asfaltam). Neskatoties uz atšķirīgām novecināšanas temperatūrām, redzams, ka testēšanas rezultāti novecinātajiem siltajam un karstajam asfaltam ir līdzīgi.

Tā kā rūpnīcā izgatavotiem maisījumiem atšķirība riteņa sliedes veidošanās rezultātos ir redzama, bet laboratorijā izgatavotiem nav redzama, optimālā gadījumā ieteicams veikt testēšanu rūpnīcā izgatavotam siltajam asfaltam, kas sagatavots pie ražošanai paredzētās temperatūras. Ja tas nav iespējams, laboratorijā izgatavotiem maisījumiem pirms testēšanas ieteicams veikt novecināšanu samazinātā temperatūrā. Temperatūras samazinājumu ieteicams pieņemt proporcionālu atšķirībai starp karstā un siltā asfalta ražošanas temperatūrām.



Attēls 43. Proporcionālais sliedes dziļums laboratorijā izgatavotiem, rūpnīcā ražotiem paraugiem un urbumiem. Visi maisījumi izgatavoti pēc vienas receptes, bet atšķiras izgatavošanas temperatūra un novecināšanas apstākļi



Attēls 44. Riteņa sliedes veidošanās slīpums laboratorijā izgatavotiem, rūpnīcā ražotiem paraugiem un urbumiem. Visi maisījumi izgatavoti pēc vienas receptes, bet atšķiras izgatavošanas temperatūra un novecināšanas apstākļi.

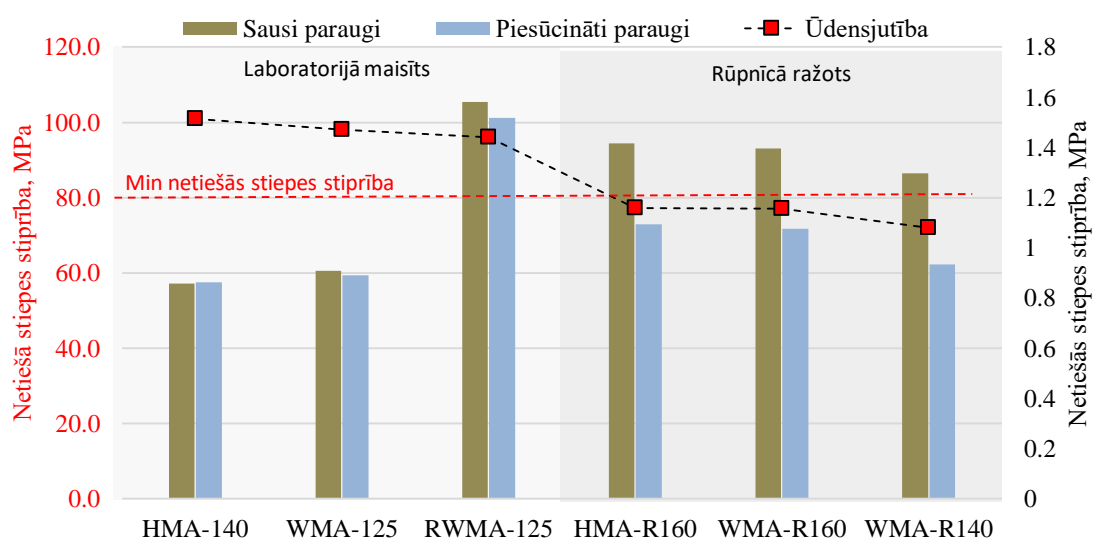
## 4.5. Ūdensjutība

Laboratorijā izgatavoto paraugu netiešās stiepes stiprība un ūdensjutība redzama 45. Attēlā. Redzams, ka visi laboratorijā sagatavotie maisījumi izpilda minimālo ūdensjutības prasību, kas ir 80%. Savukārt rūpnīcā izgatavotie maisījumi, tajā skaitā nemodificēts karstais asfalts, nedaudz atpaliek no prasības. Gan rūpnīcā, gan arī laboratorijā izgatavotam asfaltam temperatūras samazināšana nedaudz samazinājusi ūdensjutību.



Atgādinu, ka HMA maisījumiem gan laboratorijā, gan rūpnīcā tika pievienota adhēziju uzlabojoša piedeva. Savukārt WMA maisījumiem tā tika aizstāta ar WMA piedevu. No rezultātiem secināms, ka siltā asfalta piedeva nodrošina līdzīgu adhēziju kā adhēzijas piedeva.

Paaugstināta ūdensjutība ir viena no galvenajām problēmām, ar ko iespējams saskarties, lietojot siltā asfalta tehnoloģijas (īemesli detalizēti aprakstīti 1.5.1. nodaļā), tāpēc tam ražošanā jāpievērš īpaša vērība. Tā kā samazinot temperatūru testēšanas rezultātos novērojama ūdensjutības paaugstināšanās, tad ieteicams veikt ūdensjutības testu kvalitātes kontroles ietvaros katru reizi, kad tiek pielietota siltā asfalta tehnoloģija un samazināta temperatūra. Šāda prasība pieņemta arī citās pasaules valstīs.

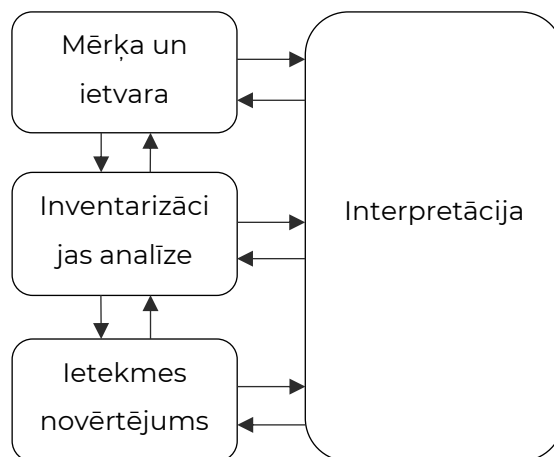


Attēls 45. Ūdensjutība laboratorijā izgatavotiem maisījumiem.

## 5. Siltumnīcefekta gāzu emisijas

Siltā asfalta maisījumi var tikt ražoti pie zemākas temperatūras nekā karstais asfalts. Tas norāda uz potenciālu enerģijas patēriņa un līdz ar to arī dzīves cikla siltumnīcefekta emisiju samazināšanos.

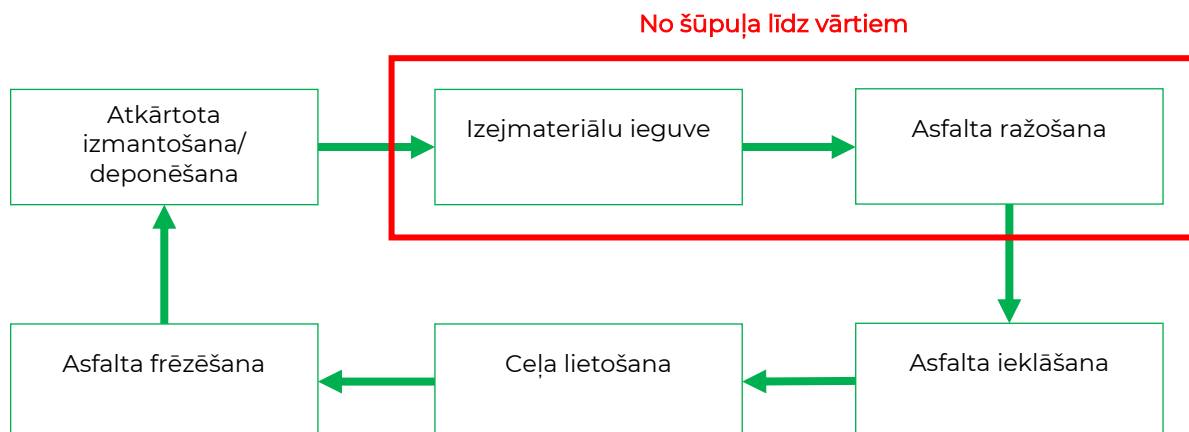
Tomēr, lai izvērtētu kādas tehnoloģijas ietekmi uz vidi, jāņem vērā viss tās dzīves cikls, ne tikai ražošana. Eiropā dzīves cikla emisiju aprēķinu reglamentē ISO 14040. Dzīves cikla ietekmes noteikšanas ietvars no šī standarta norādīts 46. Attēlā.



Attēls 46. Dzīves cikla ietekmes aprēķina ietvars saskaņā ar ISO 14040.

Kā redzams ISO 14040 metodoloģijā, pirmais uzdevums ir mērķa un darbības jomas definēšana. Šajā gadījumā to var definēt kā siltā un tradicionāli lietotā karstā asfalta ietekmes uz vidi salīdzināšana.

Savukārt, balstoties uz šī pētījuma rezultātiem, darbības ietvaru var definēt kā emisiju salīdzināšanu, analizējot HMA un WMA tehnoloģiju ietekmi uz vidi „no šūpuļa līdz vārtiem”. Šī stadija redzama 47. Attēlā un ietver izejmateriālu ieguvu, piegādi un asfalta ražošanu. Sistēmas robežu var šādi definēt, jo saskaņā ar šī pētījuma eksperimentālo daļu (3. un 4. nodaļa) un arī literatūras apskatu (1. nodaļa), siltā un karstā asfalta iekļāšana veicama vienlīdzīgi un arī īpašības kalpošanas laikā var pieņemt par vienlīdzīgām. Tāpat literatūras apskatā netika atklāti iemesli, kas neļautu silto asfaltu izmantot atkārtoti. Tā kā šajās dzīves cikla stadijās HMA un WMA lietošanā nav atšķirību, tad tās var ignorēt.



Attēls 47. Siltā un karstā asfalta ietekmes uz vidi salīdzināšanas sistēmas robeža.

## 5.1. Izejmateriālu ieguve

Saistībā ar izejmateriālu ieguvi, galvenā atšķirība starp silto un karsto asfaltu, ir siltā asfalta piedevas pievienošana. Vienīgais izņēmums ir putu bitumena tehnoloģijas, kur tiek izmantots ūdens.

Siltā asfalta piedevas dozācija parasti ir ļoti zema – atkarībā no piedevas parasti ap 0.3 līdz 5% no bitumena satura. Pieņemot 5% bitumena saturu maisījumā, piedevas daudzums ir ap 0.0015 līdz 0.025% no asfalta maisījuma masas. Diemžēl literatūrā nav atrodamā uzticama informācija par dažādu siltā asfalta piedevu radītajām dzīves cikla emisijām un enerģijas patēriņu ražošanas. Šī iemesla dēļ dažādās publikācijas šie lielumi pieņemti līdzīgi kā citām asfalta ražošanas piedevām, kā piemēram polimērmodificētam bitumenam un adhēzijas piedevām.

Izmantojot šādus pieņēmumus, *Ma et al.* [36] dzīves cikla aprēķinā WMA piedevu lietošana (ieskaitot ražošanu un transportu) palielināja dzīves cikla siltumnīcefekta emisijas no asfalta ražošanas par 2.8%.

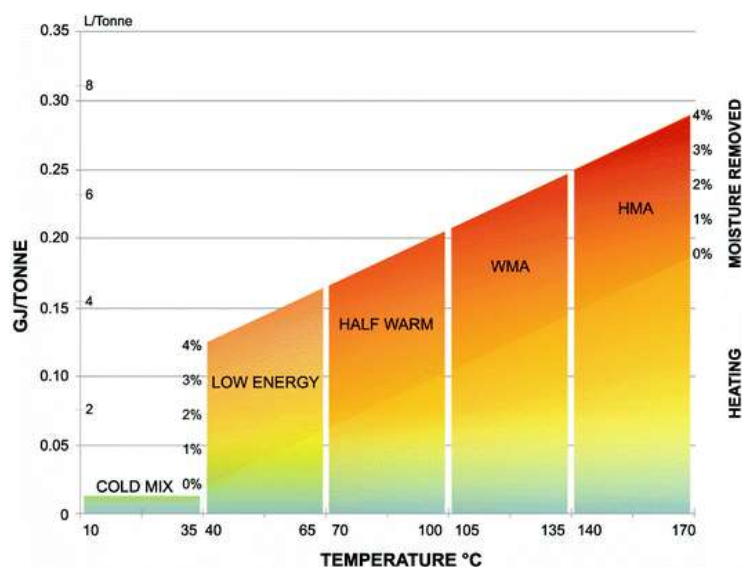
Jāņem arī vērā, ka WMA piedevas var aizstāt adhēziju uzlabojošās piedevas, kas daudzos gadījumos tiek izmantotas karstā asfalta ražošanā. Tātad var pieņemt, ka atšķirība starp piedevu lietošanu HMA un WMA maisījumos vairumā gadījumos ir vai nu ļoti maza vai neeksistējoša. Tā kā ir daudz nezināmo un iespējamās izmaiņas emisiju un enerģijas rezultātos ir mazas, tālejošus secinājumus izdarīt nav iespējams.

## 5.2. Asfalta ražošana

Galvenās izmaiņas starp HMA un WMA tehnoloģijām novērojamas enerģijas patēriņa un siltumnīcefekta gāzu emisiju izmaiņās ražošanas laikā. Tas saistīts ar iespēju samazināt ražošanas temperatūru. Kā iepriekš norādīts literatūras apskatā (1. nodaļa),

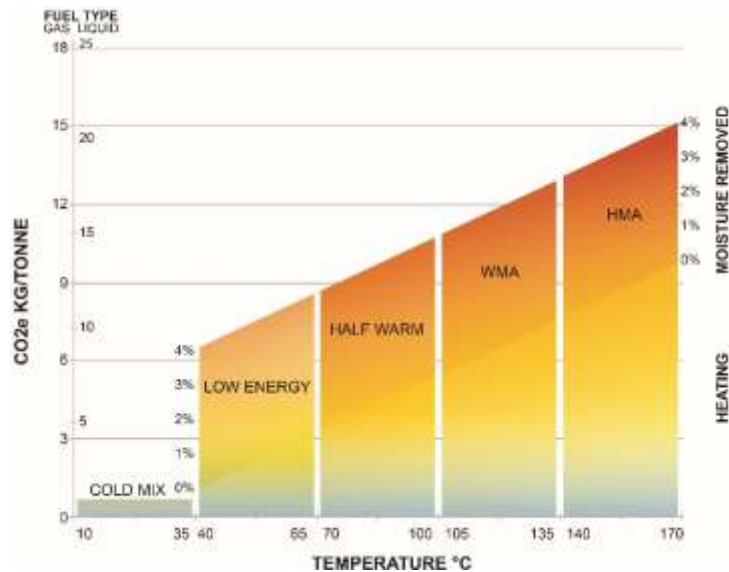
atkarībā no siltā asfalta tehnoloģijas, temperatūru ir iespējams samazināt par 15°C līdz pat 50°C. Šī pētījuma izmēģinājuma posma iekļāšanās temperatūras samazinājums bija 20°C. Tas var tikt uzskatīts par tipisku gadījumu vairumam siltā asfalta tehnoloģiju.

Enerģijas patēriņš asfalta ražošanā atkarībā no ražošanas temperatūras demonstrēts 48. Attēlā un izmešu daudzums 49. Attēlā [13]. Attēlos norādīts arī enerģijas patēriņš un emisijas atkarībā no minerālmateriālu mitruma satura. Šie ir teorētiski aprēķini, kas veikti balstoties uz termodinamikas likumiem, tomēr aptuveni šādi rezultāti tikuši ziņoti arī vairākās publikācijās, kurās aprakstīti mērījumu rezultāti. *Prowell* et al. [21] ir apkopojuši enerģijas patēriņu 15 dažādos projektos, kuros tika pielietotas siltā asfalta tehnoloģijas. Vidējais enerģijas patēriņa samazinājums bija 23%. Arī NCHRP 9-47A projekts ziņo par līdzīgu enerģijas patēriņa samazinājumu no piecām dažādām asfalta rūpnīcām: vidēji 22.1% enerģijas samazinājums pie 27°C temperatūras samazinājuma. *Yong* savukārt ir noteicis, ka samazinot ražošanas temperatūru par 6°C, kurināmā patēriņš samazinās par 2-3% [37]. Atsevišķas tehnoloģijas, kurās tiek izmantotas īpaši zemas temperatūras (zemas enerģijas asfalts), var ļaut samazināt enerģijas patēriņu pat uz pusi [20].



Attēls 48. Enerģijas patēriņš pie dažādas asfalta ražošanas temperatūras.

Saprotams, ka enerģijas patēriņa samazinājums ļauj samazināt arī emisijas. To izmaiņas ir atkarīgas no izmantotā enerģijas veida (dabas gāze, nafta, u.c.), kas arī redzams 49. Attēlā. NCHRP 9-47A ziņojumā [20] norādīts, ka ražošanas temperatūras samazināšana par 29°C rezultējās emisiju samazinājumā par aptuveni 20% un enerģijas patēriņš samazinājās par 21%. Jāņem vērā, ka emisiju samazinājums iespējams tikai, ja ir optimāli noregulēts degmaisījuma saturs. Šis pats ziņojums norāda, ka atsevišķos gadījumos to ir grūti panākt visam ražošanas temperatūru intervālam (HMA un WMA temperatūras).



Attēls 49. CO2 izmešu daudzuma pie dažādas ražošanas tehnoloģijas.

Dažādās valstīs siltais asfalts tiek definēts dažādā veidā. ASV, piemēram, jebkurš maisījums, kurā izmantotas siltā asfalta tehnoloģijas, neskatoties uz ražošanas temperatūru, tiek uzskatīts par silto asfaltu. Citās valstīs savukārt ir definēts temperatūras samazinājuma intervāls salīdzinājumā ar karsto asfaltu vai ražošanas temperatūra.

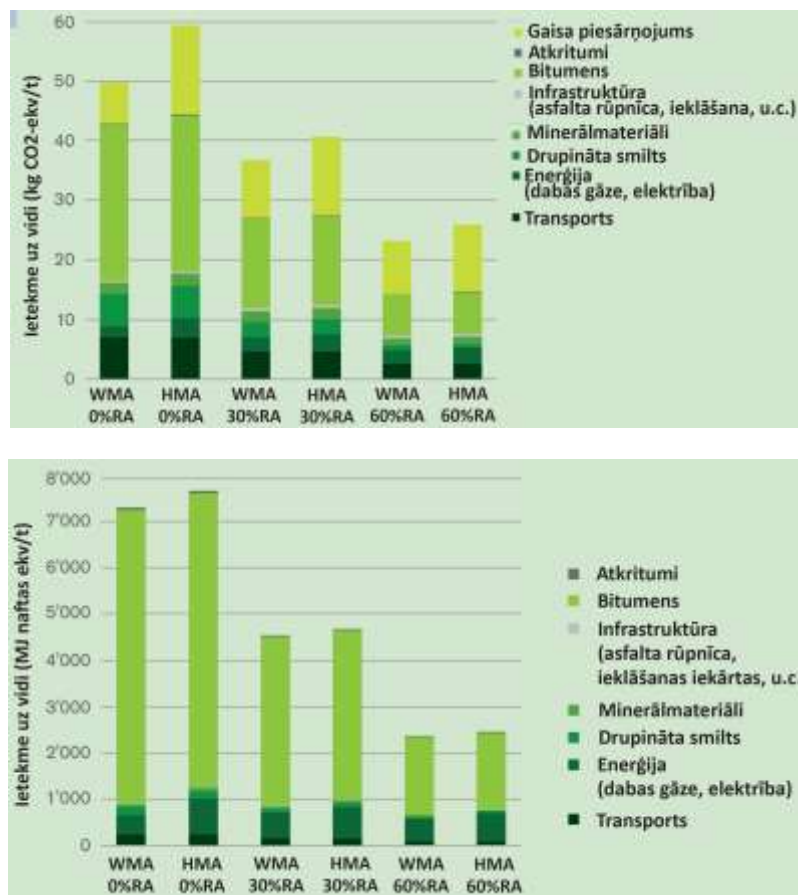
Neprecīza siltā asfalta definēšana var radīt situāciju, ka nekādi ekoloģiskie ieguvumi netiek nodrošināti, jo kā redzams temperatūra ir galvenais faktors, kas to ietekmē. Tāpēc ieteicams Ceļu specifikācijās definēt siltā asfalta ražošanas temperatūras samazinājumu salīdzinājumā ar karsto asfaltu. Definīcija atļautu siltā asfalta tehnoloģiju uzskatīt par videi draudzīgu aprītē balstīta iepirkuma procedūrā. Temperatūras samazinājumu ieteicams noteikt kā vismaz 20°C zemāku par attiecīgo karstā asfalta temperatūru.

Alternatīvi būtu iespējams norādīt arī ražošanas temperatūras intervālu, tomēr šajā gadījumā intervāls jānorāda atsevišķi katram bitumena tipam.

### 5.3. Siltā un karstā asfalta salīdzinājums ciklā „no šūpuļa līdz vārtiem”

50. Attēlā redzami Šveices zinātnieku S. Kytzia un T. Pohl pētījuma rezultāti. Pētījums veikts, nosakot sistēmas robežu „no šūpuļa līdz vārtiem” (angl. *cradle to gate*). Tas nozīmē, ka pētījumā iekļauta asfalta izejmateriālu ražošana un asfalta ražošana, bet nav iekļautas citas dzīves cikla sastāvdaļas kā, piemēram, ceļa lietošana.

Pētījuma rezultātos 50. Attēlā redzams, ka siltā asfalta tehnoloģijas nodrošina gan enerģijas, gan emisiju samazinājumu salīdzinājumā ar karsto asfaltu. Siltumnīcefekta emisijas samazinājušās par 16%, bet enerģijas patēriņš – par 7%. Kā jau iepriekš rakstīts, šie ieguvumi saistīti ar enerģijas patēriņa samazināšanu ražošanas laikā.



Attēls 50. Siltumnīcefekta emisiju (augšā) un enerģijas patēriņš (apakšā) siltajam un karstajam asfaltam pie dažādiem frēzētā asfalta saturiem [38].

Lai izprastu siltā asfalta ekoloģisko ieguvumu kontekstu, ir vērts to salīdzināt ar citu videi draudzīgu asfalta ražošanas tehnoloģiju – frēzētā asfalta pielietošanu. Turklāt, kā jau iepriekš minēts 1.3.2 nodaļā, tad šo tehnoloģiju vienlaicīgā lietošana var izraisīt simbiozi, kas nodrošina ražošanas priekšrocības abām tehnoloģijām.

Kā redzams 50. Attēlā, ekoloģiskie ieguvumi no WMA tehnoloģiju lietošanas ir salīdzinoši daudz mazāki, nekā pievienojot frēzēto asfaltu. Piemēram, 30% frēzētā asfalta pievienošana samazina siltumnīcefekta gāzu emisijas par 32% un enerģijas patēriņu par 39%. Tas galvenokārt saistīts ar samazinātu svaigo materiālu, īpaši jau bitumena, patēriņu.

Pie līdzīgiem secinājumiem nonākuši arī ES finansētā projekta *Re-Road* autori. Izmantojot dzīves cikla aprēķina metodoloģiju, viņi noteica, ka pat pie 15% frēzētā asfalta satura (kas ir salīdzinoši neliels) ekoloģiskie ieguvumi ir lielāki, nekā samazinot ražošanas temperatūru no 165 °C uz 130°C [39].

## 6. Secinājumi un rekomendācijas

Pētījuma rezultāti norāda, ka siltā asfalta tehnoloģijas var nodrošināt līdzvērtīgas asfalta īpašības kā tradicionālā karstā asfalta tehnoloģija. Atsevišķos gadījumos siltā asfalta tehnoloģijas var nodrošināt zināmas priekšrocības kā, piemēram, ieklāšana pie nelabvēlīgiem apkārtējās vides apstākļiem un termālās segregācijas seku samazināšana. Tāpat siltā asfalta tehnoloģijas nodrošina emisiju samazināšanos. Lai WMA tehnoloģijas sekmīgi pielietotu, ražotājiem jāņem vērā labā prakse ražošanas un ieklāšanas laikā. Tā aprakstīta lieteratūras apskata daļā.

Galvenās pētījuma rekomendācijas:

1. Siltā asfalta tehnoloģijas dažādās valstīs tiek definētas atšķirīgi. Tas rada neskaidrības. Lai nodrošinātu, ka aprītē balstīta iepirkuma procedūrā siltā asfalta tehnoloģijas var tikt norādītas kā videi draudzīgas, ieteicams pievienot siltā asfalta definīciju Ceļu specifikācijās. Piemēram:  
*Tehnoloģijas, kas samazina ražošanas temperatūru par vismaz 20°C salīdzinājumā ar attiecīgo karsto asfaltu. Šādi ražots asfalts var tikt pielietots kā alternatīva karstajam asfaltam.*
2. Tā kā siltā asfalta tehnoloģijas var nodrošināt iestrādājamības priekšrocības, kas var tikt panāktas nesamazinot ražošanas temperatūru, Ceļu specifikācijās ieteicams pievienot definīciju viegliestrādājamību uzlabojošām tehnoloģijām. Piemēram:
3. Piedevas vai tehnoloģijas, kas uzlabo asfalta iestrādājamību.
4. Ražošanas temperatūras samazināšana pasliktina masījuma ūdensjutību, tāpēc siltā asfalta ražošanas gadījumā obligāti jālieto adhēziju veicinošas piedevas. Ja WMA ražošanā tiek izmantotas ķīmiskās piedevas, tās var aizstāt adhēzijas piedevas. Lai pārliecinātos par ūdensjutību, veikt testēšanu un atbilstības novērtēšanu saskaņā ar Ceļu specifikācijām.
5. Siltā asfalta lietošanas veicināšanai ieteicams pievienot atsauci uz šo tehnoloģiju arī aprakstos pie Ceļu specifikāciju 2019 tabulām 6.2-13, -50, -66 un -75. Tas ražotājiem dotu informāciju par šādu tehnoloģiju esamību un pasūtītājam informāciju par iespēju to pieprasīt.
6. Temperatūras samazināšana ievērojami samazina izgarojumus ieklāšanas laikā. Tas var nodrošināt labākus daba apstākļus ieklāšanas brigādei, īpaši ja tiek ieklāts mīksts vai emulsijas asfalts. Blīvi apdzīvotās teritorijās siltais asfalts var tikt lietots, lai nodrošinātu komfortablākus apstākļus apkārtējiem iedzīvotājiem.
7. Latvijas ceļu specifikācijās 2019 piedevu lietošana ir atļauta, lai arī specifiski siltā asfalta piedevas nav norādītas. Tabulās 6.2-13, -50, -66 un 6.3-1 norādīta projektēšanas

temperatūra, tomēr ražotājam dota iespēja izvēlēties citu projektēšanas temperatūru, ja tiek pielietotas piedevas. Šī prasība ir pamatota, jo, lai gan silto asfaltu iespējams ražot arī bez piedevu pievienošanas, projektēšana putu bitumenu saturošiem maisījumiem būtu jāveic pie karstā asfalta temperatūras. Tikai ražošanas laikā temperatūra tiek samazināta.

8. Siltā asfalta projektēšanu ieteicams veikt karstā asfalta temperatūrā. Piedevas, ja tādas tiek izmantots, pievienot tikai ražošanas laikā.
9. Ceļu specifikāciju 2019 Tabulā 6.2-75 norādīta asfalta maisījuma maksimālā ražošanas temperatūra. Principiāli tātad ir atļauta temperatūras samazināšana. Punktā 6.2.6.4.1 gan nepieciešams veikt izmaiņu – siltā asfalta lietošanas gadījumā mērķa temperatūru būtu jānosaka asfalta maisījuma, nevis piedevu ražotājam. Tas dotu iespēju izvēlēties atbilstošāko temperatūru konkrētajiem apstākļiem un pievienotās piedevas daudzumam.
10. Ceļu specifikāciju tabulā 6.2-74 norādītas prasības apkārtējās vides un pamatnes temperatūrai. Ieteicams pievienot prasību par siltā asfalta piedevu lietošanu nelabvēlīgos apstākļos, jo siltā asfalta tehnoloģiju lietošana, salīdzinājumā ar karsto asfaltu, ļauj ar lielāku drošības rezervi sablīvēt maisījumu pie nelabvēlīgākiem apkārtējās vides apstākļiem. Var pievienot šādu teikumu:

*Pie temperatūras, kas ir mazāk nekā 5°C virs minimālās robežas, ieteicams lietot viegliestrādājamību uzlabojošas tehnoloģijas.*

11. Ja ieklāšanas apstākļi ir zem Ceļu specifikāciju tabulā 6.2-74 norādītajām prasībām, vienmēr pieprasīt viegliestrādājamības piedevu pielietošanu.
12. Ieklājot plānkārtas asfaltbetonu, vienmēr prasīt lietot siltā asfalta tehnoloģiju.
13. Lai nodrošinātu mazu termālo segregāciju, rekomendējams izstrādāt kontroles sistēmu, kas būtu līdzīga Igaunijas pieredzei ar nepārtrauktiem termogrāfijas mērījumiem ieklāšanas laikā. Šī pētījuma ietvaros redzams, ka termālo segregāciju iespējams samazināt gan ar termoizolētām kravas kastēm, gan ar antisegregācijas iekārtas palīdzību.
14. Siltā asfalta ražošanas laikā sagaidāma samazināta bitumena novecošanās. Tā rezultātā testēšanas rezultāti var norādīt palielinātas riteņa slīdes izraisītās deformācijas. Lai šo atšķirību ievērtētu maisījuma receptu sagatavošanā, nepieciešams maisījumus vai nu izgatavot rūpnīcā vai laboratorijā izgatavotiem maisījumiem veikt īstermiņa novecināšanu pie proporcionāli samazinātas temperatūras. Arī reprezentatīva karstā asfalta iegūšanai, ja receptes apstiprināšanai izmanto no laboratorijā izgatavotu asfalta paraugu, nepieciešams veikt īstermiņa novecināšanu.



15. Samazinot maisīšanas temperatūru, testēto paraugu ūdensjutība pasliktinājās. Ieteicams veikt ūdensjutības testu kvalitātes kontroles ietvaros katru reizi, kad tiek siltā asfalta tehnoloģija tiek pielietota, lai samazinātu ražošanas temperatūru.
16. Laboratorijas sablīvēšanas metodes nespēj reproducēt sablīvēšanas apstākļus, kas sastopami būvobjektā. Šī iemesla dēļ optimālo sablīvēšanas temperatūru ieteicams noteikt no izmēģinājuma posmā veiktiem mērījumiem.
17. Saskaņā ar Ceļu specifikācijām ieklātā seguma poru satura kontrolei noteiktās prasības ir atkarīgas no porainības paraugiem, kas sablīvēti ar Māršala āmuru. Pētījuma rezultātos redzams, ka Māršala āmurs nespēj simulēt sablīvējumu WMA maisījumiem, kāds sastopams būvobjektā. Tāpēc ieteicams izvirzīt prasības siltā asfalta porainībai, veicot asfalta masas paraugu sablīvēšanu ar Māršala āmuru pie karstajam asfaltam atbilstošas temperatūras, neatkarīgi no tā, vai būvobjektā ir pielietota siltā asfalta tehnoloģija.
18. Temperatūras samazināšana ražošanas „no šūpuļa līdz vārtiem” cikla laikā var nodrošināt enerģijas patēriņa samazinājumu par 7% un siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājumu par aptuveni 16%. Galvenokārt izmaiņas saistītas ar enerģijas patēriņa samazināšanos ražošanas laikā. Tāpēc nepieciešamības gadījumā iespējams izmantot vienkāršotu aprēķinu, kas ietver tikai ražošanas procesu. Aptuvenām aplēsēm iespējams arī izmantot 48. un 49. Attēlus.
19. Lai nodrošinātu ekoloģiskās priekšrocības WMA ražošanas laikā, nepieciešams nodrošināt atbilstošu rūpnīcas degmaisījuma regulējumu.
20. Eiropas standarti “Bitumenizētie maisījumi” (EN 13108-1 līdz -7) neierobežo siltā asfalta lietošanu. Standartos ir sadaļas par piedevu pievienošanu, kur noteikts, ka jānodrošina vismaz līdzvērtīgas īpašības kā references maisījumam. To ir iespējams demonstrēt, veicot ekspluatācijas īpašību testēšanu laboratorijā vai veicot izmēģinājuma posma izbūvi.

# Pateicības

Izsaku pateicību VAS „Latvijas Valsts ceļi” Autoceļu Kompetences Centra darbiniekiem Jānim Barbaram, Jānim Baumanim, Kārlim Bajāram, Viktoram Tamam, Mārtiņam Jansonam, Mārtiņam Gravam un Vladimiram Akimovam. Tāpat pateicos par veiksmīgo sadarbību Jurim Dupuram un SIA „Strabag Latvija”, Jānim Kivilandam un Mukul Rathore no SIA „Ceļu Eksperts”, Marek Truu un Romet Raun no AS „Teede Tehnokeskus”, Edvardam Pavlovskim no SIA „Binders”, Stefan Pischedda no „Ingevity”.

Bez jūsu aktīvā atbalsta pētījuma izstrādē, konsultācijām, nepieciešamo datu nodrošināšanā, sadarbības maisījumu projektēšanā, testēšanā un materiālu nodrošināšanā šādu pētījumu nebūtu iespējams izstrādāt. Paldies!

# Izmantotā literatūra

- [1] A. Vaitkus, D. Cygas, A. Laurinavicius, Z. Perveneckas, Analysis and Evaluation of Possibilities for The Use of Warm Mix Asphalt in Lithuania, *Balt. J. Road Bridg. Eng.* 4 (2009) 80–86. <https://trid.trb.org/view/894563> (accessed January 25, 2019).
- [2] NAPA, Asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage 2016, Lanham, MD, 2017. [http://www.asphaltpavement.org/PDFs/IS138/IS138-2016\\_RAP-RAS-WMA\\_Survey\\_Final.pdf](http://www.asphaltpavement.org/PDFs/IS138/IS138-2016_RAP-RAS-WMA_Survey_Final.pdf).
- [3] B. Williams, J. Willis, T. Ross, Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2018, Greenbelt, MD, USA, 2018. [https://www.asphaltpavement.org/PDFs/IS138/IS138-2018\\_RAP-RAS-WMA\\_Survey\\_Final.pdf](https://www.asphaltpavement.org/PDFs/IS138/IS138-2018_RAP-RAS-WMA_Survey_Final.pdf) (accessed February 5, 2020).
- [4] EAPA, Asphalt in figures 2017, Brussels, 2018. [https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/12/AIF\\_2017.pdf](https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/12/AIF_2017.pdf) (accessed January 25, 2019).
- [5] A. Chowdhury, J.W. Button, A Review of Warm Mix Asphalt, College Station, TX, US, 2008. <http://www.ntis.gov> (accessed January 28, 2019).
- [6] K.J. Jenkins, Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis of foamed bitumen, Stellenbosch: Stellenbosch University, 2000. <http://scholar.sun.ac.za/handle/10019.1/51831> (accessed January 28, 2019).
- [7] EAPA, The use of Warm Mix Asphalt, Brussels, Belgium, 2014. [www.eapa.org](http://www.eapa.org) (accessed January 28, 2019).
- [8] A. Chowdhury, J.W. Button, A review of warm mix asphalt, Texas transportation institute, College Station, TX, 2008.
- [9] J. D'Angelo, E. Harm, J. Bartoszek, G. Baumgardner, M. Corrigan, J. Cowser, T. Harman, M. Jamshidi, W. Jones, D. Newcomb, B. Prowell, R. Sines, B. Yeaton, Warm-Mix Asphalt: European Practice, (2008).
- [10] M. Wanger, K. Stangl, B. R., Fischer-tropsch paraffin modified bitumen - performance parameter and reduction of energy consumption, in: ISAP Int. Symp. Asph. Pavements Environ., Zurich, Switzerland, 2008: pp. 197–206.
- [11] I.L. Howard, J.D. Doyle, J.M. Hemsley, G.L. Baumgardner, L.A. Cooley, Emergency paving using hot-mixed asphalt incorporating warm mix technology, *Int. J. Pavement Eng.* 15 (2014) 202–214. <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.721549>.

- [12] Z.-P. You, S.-W. Goh, Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt: A Preliminary Study, *Int. J. Pavement Res. Technol.* 1 (2008) 34–40. [https://doi.org/10.6135/IJPRT.ORG.TW/2008.1\(1\).34](https://doi.org/10.6135/IJPRT.ORG.TW/2008.1(1).34).
- [13] M. Zaumanis, Warm Mix Asphalt, in: *Clim. Chang. Energy, Sustain. Pavements*, 2014: pp. 309–334. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-44719-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44719-2_10).
- [14] M.C. Rubio, G. Martínez, L. Baena, F. Moreno, Warm mix asphalt: an overview, *J. Clean. Prod.* 24 (2012) 76–84. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2011.11.053>.
- [15] O. Kristjansdottir, Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving, University of Washington, 2006. <https://pdfs.semanticscholar.org/050c/2038733e000aed4895b948a77cf959bef68b.pdf> (accessed January 25, 2019).
- [16] R. Lee, Summary of Texas' experience with warm mix asphalt, in: *Present. Louisiana Warm-Mix Demonstr., Shreveport, LA, 2008*.
- [17] A. Kriech, L. Osborn, B. Prowell, A.P. Redman, R. West, Comparison of worker breathing zone exposures between hot mix asphalt and warm mix asphalt applications., in: *2nd Int. Warm Mix Conf., St. Louis, MO, USA, 2011*.
- [18] H.C.A. Brandt, P.C. de Groot, A Laboratory Rig for Studying Aspects of Worker Exposure to Bitumen Fumes, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 60 (1999) 182–190. <https://doi.org/10.1080/00028899908984433>.
- [19] R. Bonaquist, Mix design practices for warm-mix asphalt, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2011. <https://doi.org/https://doi.org/10.17226/14488>.
- [20] R. West, Carolina Rodezno, Grant Julian, Brian Prowell, Engineering properties and field performance of warm mix asphalt technologies, Auburn, AL, USA, 2014. [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP09-47A\\_FR-Volumel.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP09-47A_FR-Volumel.pdf) (accessed January 28, 2019).
- [21] B.D. Prowell, G.C. Hurley, B. Frank, Warm-Mix Asphalt: Best Practices, 3rd Edition, Lunham, MD, USA, 2012. [www.AsphaltPavement.org](http://www.AsphaltPavement.org) (accessed January 28, 2019).
- [22] D. Jones, Z. Wu, B. Tsai, C. Barros, J. Petersen, Accelerated loading, laboratory, and field testing studies to fast-track the implementation of warm mix asphalt in California, in: *Adv. Pavement Des. through Full-Scale Accel. Pavement Test., Taylor & Francis Group*, 2012: pp. 165–173.
- [23] G. Hurley, B. Prowell, Evaluation of potential processes for use in warm mix asphalt, *J. Assoc. Asph. Paving Technol.* 75 (2006) 41–49.

- [24] F. Xiao, V.S. Punith, B.J. Putman, Effect of Compaction Temperature on Rutting and Moisture Resistance of Foamed Warm-Mix-Asphalt Mixtures, *J. Mater. Civ. Eng.* 25 (2013) 1344–1352. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000664](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000664).
- [25] H. Wen, S. Wu, L.N. Mohammad, W. Zhang, S. Shen, A. Faheem, Long-term field rutting and moisture susceptibility performance of warm-mix asphalt pavement, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 2575 (2016) 103–112.
- [26] S. Wu, H. Wen, W. Zhang, S. Shen, L.N. Mohammad, A. Faheem, B. Muhunthan, Field performance of top-down fatigue cracking for warm mix asphalt pavements, *Int. J. Pavement Eng.* 20 (2019) 33–43. <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1248204>.
- [27] P.J. Yoo, I.L. Al-Qadi, The truth and myth of fatigue cracking potential in hot-mix asphalt: numerical analysis and validation, *J. Assoc. Asph. Paving Technol.* 77 (2008) 549–590. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.042>.
- [28] W. Zhao, F. Xiao, S.N. Amirkhanian, B.J. Putman, Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures, *Constr. Build. Mater.* 31 (2012) 265–272. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.12.101>.
- [29] R. Brown, Performace of warm mix asphalt, in: 2011. [http://www.warmmixasphalt.com/submissions/148\\_20121112\\_5](http://www.warmmixasphalt.com/submissions/148_20121112_5) Performance of WMA, Atlanta WMA Workshop.pdf.
- [30] NAPA, MultiCool, (n.d.).
- [31] M. Zaumanis, Latvijā pieejamā reciklētā asfalta īpašību analīze un vadlīniju izstrāde izmantošanai karstajos asfalta maisījumos, Rīga, 2017.
- [32] BOMAG, Basic Principles of Asphalt Compaction. Compaction methods Compaction equipment Rolling technique, Hellerwald, Germany, 2009. [www.bomag.com](http://www.bomag.com) (accessed January 29, 2019).
- [33] M. Truu, Application of thermographic system (TGS) for monitoring asphalt paving temperatures, (n.d.).
- [34] K.A. Willoughby, J.P. Mahoney, L.M. Pierce, J.S. Uhlmeier, K.W. Anderson, S.A. Read, S.T. Muench, T.R. Thompson, R. Moore, Construction-related asphalt concrete pavement temperature differentials and the corresponding density differentials, Washington, D.C., 2001. <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/476.1.pdf>.
- [35] C.S. Hughes, Compaction of asphalt pavement, 1989.

[36] H. Ma, Z. Zhang, X. Zhao, S. Wu, A Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Warm Mix Asphalt (WMA) and Hot Mix Asphalt (HMA) Pavement: A Case Study in China, (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/9391857>.

[37] T.J. Young, Energy conservation in hot-mix asphalt production, NAPA, Lanham, MD, 2007.

[38] T. Pohl, S. Kytzia, Ökobilanz der Herstellung von Asphaltbelägen, Straße Und Autobahn. (n.d.) 830–836.

[39] M. Waymen, Y. Andersson-Skold, R. Bergmen, Y. Huang, T. Parry, J. Raaberg, A. Enell, Life Cycle Assessment of Reclaimed Asphalt, 2012.

# Pielikums 1. AS "Teede Tehnokeskus" atskaite par termogrāfijas mērījumiem

*\*Pieejams pēc pieprasījuma, rakstot uz [janis.baumanis@lvceli.lv](mailto:janis.baumanis@lvceli.lv)*

# Pielikums 2. Multicool kalkulācijas programma

Datorprogramma: pielikumā

Android aplikācija:

(<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.AUcivil.MC2&hl=en>),

Online aplikācija:

(<http://www.eng.auburn.edu/users/timmdav/MultiCool/FinalRelease/Main.html>).